



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OLLI HAUTANIEMI
SÄHKÖNSIIRTOON TARKOITETTUIJEN RAKENTEIDEN SUUN-
NITTELU JA MITOITUS
Diplomityö

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
5. maaliskuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

HAUTANIEMI, OLLI: Sähkönsiirtoon tarkoitettujen rakenteiden suunnittelu ja mitoitus

Diplomityö, 92 sivua, 16 liitesivua

Elokuu 2014

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg

Avainsanat: Sähkönsiirtorakenteet, voimajohdot, sähköasemat, ulkokytkinlaitokset, kuormat

Sähkönsiirtorakenteet koostuvat voimajohdoista ja niitä yhdistävistä sähköasemista. Yhdessä ne muodostavat koko maan kattavan sähköverkon ja yhden tärkeimmistä infrastruktuureista. Sähkönsiirtorakenteita voidaan pitää erikoisrakenteina, sillä ne eroavat luonteeltaan tavanomaisista rakennuksista. Lisäksi niihin vaikuttaa kuormia, joita muualla rakentamisessa ei esiinny. Sähkönsiirtorakenteista on alan kirjallisuudessa vähän tietoa ja aiheeseen liittyvät standardit ovat paikoin hyvin suppeita. Työn päätarkoituksena on selvittää, mitä rakennesuunnittelijan tulisi tietää sähkönsiirtorakenteista. Luonteensa vuoksi työ soveltuu hyvin aihealueen perusoppaaksi, jos aikaisempaa tietoa sähkönsiirtorakenteista ei ole. Työn pääpaino on ulos rakennettavissa sähköasemissa, eli ulkokytkinlaitoksissa.

Työ koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen osa sisältää kirjallisuusselvityksen, joka perustuu oppikirjoihin, standardeihin, ohjeisiin ja sähköalalla toimivien yritysten materiaaleihin. Siinä kerrotaan sähkönsiirtotekniikasta, eristysrakenteista, sähköasemista, voimajohdoista ja niitä koskevista standardeista. Toisessa osassa esitetään, mitä kuormituksia ulkokytkinlaitosten rakenteille aiheutuu, miten ne voidaan laskennallisesti määrittää ja mitä suuruusluokkaa ne tyypillisesti ovat. Näiden pohjalta on laadittu laskentaesimerkkejä.

Tavoitteena on ollut laatia kokonaisvaltainen opus, jossa käsitellään sähkönsiirtorakenteet ja sähkönsiirtoon yleisesti liittyvät keskeiset asiat. Työ antaa perusteet suunnitella ulkokytkinlaitosten rakenteita ja niille tulevia kuormia. Lisäksi suunnittelija osaa ottaa huomioon sähköä aiheuttamat erityispiirteet.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että ulkokytkinlaitosten rakenteiden suunnittelu on varsin suoraviivaista, kun osaa ottaa huomioon sähköä aiheuttamat erityispiirteet sekä standardeissa määritetyt turvaetäisyydet. Rakenneosien kestävyys tulee harvemmin miitoittavaksi tekijäksi, jos taipumat halutaan pitää pieninä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

HAUTANIEMI, OLLI: The design and analysis of electrical transmission structures

Master of Science Thesis, 92 pages, 16 Appendix pages

August 2014

Major: Structural Design

Examiner: Professor Ralf Lindberg

Keywords: Electrical transmission structures, substation structures, air-insulated substations, loads

The structures that transfer power consist of electrical transmission line structures and substation structures. Together they make up the power-distribution network which is one of the most important infrastructures of present-day. Electrical transmission structures differ from the structures of the typical buildings. They are also subjected to loads that do not occur elsewhere in the field of structural design. The amount of material in literature and standards that deal with the topic is remote. Therefore, electrical transmission structures can be regarded as special structures. The main reason of this study is to explain what a structural engineer should know about electrical transmission structures. Due to the nature of the study it also lends itself as a basic guide of the topic. The main focus of this study is on outdoor electrical substation structures, also known as air-insulated substations.

The study consists of two parts. Part one includes literature survey which is based on books, standards, guides and materials of companies that work in the field of electrical engineering. Electric transmission system, insulators and their features, substations, transmission lines and standards are discussed. Part two presents the loads that are subjected to the structures of air-insulated substations. The calculus and magnitude of the loads are also addressed. Examples of the calculations are included.

The purpose is to provide a comprehensive guide for electrical transmission structures and the basis of the power-distribution network as a whole. This study gives the basics for designing air-insulated substations and the loads that go with it. In addition, the designer is aware of the special design considerations caused by the electricity.

As a conclusion, the design of the structures of air-insulated substations is pretty straightforward. This assumes that the special effects of electric are taken into account along with the safety distances that are defined in the standards. The resistance of the structures is not typically an issue if the deflections are kept minor.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Pöyry Finland Oy:lle. Työn tarkoituksena oli selvittää ulos rakennettujen sähköasemien rakenteille tulevia kuormituksia. Diplomityön on ohjannut ja tarkistanut Tampereen teknillisen yliopiston professori Ralf Lindberg. Pöyry Finland Oy:n puolelta työn ohjaajina toimivat Kaarle Koskela ja Virpi Tuuliniemi. Kiitän Pöyry Finland Oy:tä mahdollisuudesta tehdä tämä työ sekä kaikkia ohjaajiani saamastani palautteesta.

Työ ei ollut tyypillinen rakennustekniikkaan liittyvä aihe, minkä vuoksi jouduin tekemään runsaasti sähköasioihin liittyvää taustatyötä. Asioiden selkeyttämiseksi vierailin Fingrid Oy:n ja ABB Oy:n toimistoilla. Haluan kiittää Fingrid Oy:n Mikael Wiréniä ja Ritva Lainetta sekä ABB Oy:n Juha-Matti Huhtasta heiltä saamistani tiedoista. Sähköasemavierailun osalta kiitän Wiréniä ja ABB Oy:n Seppo Hakalaa. Työn aikana sain myös neuvoja kollegoiltani ja eri tahoilta sähköpostitse varsinkin voimajohtojen suunnitteluun liittyen. Kiitän myös heitä.

Lopuksi haluan vielä kiittää rakkaita vanhempiani saamastani tuesta ja kannustuksesta läpi koko opiskeluaikani.

Tampereella 16. kesäkuuta 2014

Olli Hautaniemi

SISÄLLYS

Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto.....	1
2 Yleistä sähkönsiirtotekniikasta	3
2.1 Sähköntuotanto.....	3
2.2 Suomen sähköverkko.....	4
2.3 Sähkönsiirto ja -jakelu	5
2.4 Rakennesuunnittelu osana sähköverkkotoimintaa	6
3 Eristysaineet ja -rakenteet.....	8
3.1 Suurjännitetekniikka.....	8
3.2 Eristysrakenteiden jännitelujuus	10
3.2.1 Kaasut eristeenä.....	10
3.2.2 Kiinteät ja nestemäiset eristeet.....	10
3.3 Eristimet.....	12
3.4 Vähimmäisetaisyydet.....	14
3.4.1 Turvaetaisyydet	14
3.4.2 Kuljetusreitit.....	20
4 Sähköasemia ja voimajohtoja koskevat standardit.....	22
4.1 Sähköasemastandardit	22
4.2 Ilmajohtostandardit.....	25
4.3 Standardien vertailua	28
5 Sähköasemat	29
5.1 Yleistä	29
5.2 Sähköasemien laitteet	34
5.2.1 Muuntajat	34
5.2.2 Mittamuuntajat	35
5.2.3 Katkaisijat	36
5.2.4 Erottimet	37
5.2.5 Kompensointilaitteet.....	38
5.3 Sähköasemien suunnittelu ja erityiskysymyksiä.....	39
5.3.1 Kokoojakiskot	40
5.3.2 Muuntajarakennukset.....	40
5.3.3 Reaktorit.....	41
5.3.4 Sähköasemaliittimet.....	41
6 Voimajohdot	43
6.1 Ilmajohdot ja kaapelit	43
6.2 Pylväät	45
6.3 Johtimet ja niiden varusteet	49
6.4 Voimajohtojen suunnittelu.....	49
7 Kuormitukset	53
7.1 Kuormien yhdistely	53

7.2	Tuulikuorma.....	55
7.2.1	Tuulenpaine EC 1991-1-4 mukaan.....	56
7.2.2	Johtimien tuulikuorma	59
7.2.3	Eristimien tuulikuorma	61
7.2.4	Putkipylväiden tuulikuorma.....	61
7.2.5	Ristikkopylväiden tuulikuorma	62
7.3	Jääkuorma	65
7.4	Yhdistetty tuuli- ja jääkuorma.....	68
7.5	KytKentävoimat	68
7.6	Oikosulkuvoimat	71
7.6.1	Oikosulkuvirran aiheuttamat voimat	72
7.6.2	Kiskoihin kohdistuvat rasitukset	74
7.6.3	Tukirakenteisiin kohdistuvat rasitukset	76
7.6.4	Kertoimet V_{σ} , V_r ja V_F	77
7.6.5	Kiskojen ominaistaajuus	80
7.7	Vetokuorma.....	81
7.8	Johdinten katkeamiset.....	83
7.9	Värähtely.....	84
8	Johtopäätökset.....	86
	Lähteet.....	88
	Liiteluettelo	92

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

AIS	Ilmaeristetty sähköasema eli ulkokytkinlaitos (engl. air insulated switchgear).
ASCE	(American Society of Civil Engineers) on Restonissa päämajaansa pitävä yhdysvaltalainen asiantuntijaorganisaatio, jonka tarkoituksena on edistää hyvää suunnittelua, tietoutta ja rakennesuunnittelun asemaa.
CENELEC	(European Committee for Electrotechnical Standardization) on Brysselissä päämajaansa pitävä, eurooppalaisia sähkötekniisiä standardeja laativa ja julkaiseva yhteistyöjärjestö.
CIGRE	(Conseil International des Grands Reseaux Electriques) on maailmanlaajuinen, Pariisissa päämajaansa pitävä sähkön tuotannon ja suurvoimansiirron tekniisiin kysymyksiin keskittyvä tiedonvaihto-, tutkimus- ja kehitysjärjestö.
Energiateollisuus	Sähkö- ja kaukolämpöalaa edustava elinkeino- ja työmarkkinapoliittinen etujärjestö.
Energiavirasto	Työ- ja hallinnonalaan kuuluva virasto, joka edistää ja valvoo energiamarkkinoita, päästöjen vähentämistä, energiatehokkuutta sekä uusiutuvan energian käyttöä.
Eurokoodi	Kantavien rakenteiden suunnittelua koskevat eurooppalaiset standardit.
FEM	Elementtimenetelmä (engl. finite element method).
Fingrid Oyj	Suomen kantaverkkoyhtiö, joka vastaa sähkönsiirrosta kantaverkossa. Huolehtii myös sähkönsiirron ulkomaanyhteyksistä. Päämaja sijaitsee Helsingissä.
GIS	Kaasuieristetty sähköasema (engl. gas insulated switchgear).
IEC	(International Electrotechnical Commission) on Genevessä päämajaansa pitävä sähköalan kansainvälisiä standardeja tuottava yhteistyöjärjestö.
Resonanssi	Fysikaalinen ilmiö, jossa värähtelykykyiseen systeemiin vaikuttaa ulkopuolinen voima, jonka taajuus on sama kuin järjestelmän ominaistajuus.
Latinalaiset isot kirjaimet	
A	Tarkasteltavalle sivulle projisoidun sivun sauvojen ja nurkkalevyjen projektiopinta-alojen summa (luku 7.2.5) Kiskon poikkileikkauksen ala (luku 7.7)
A_c	Sivulle, jonka ulkomitat ovat d ja l projisoidun sivun ulkoreunojen rajaama pinta-ala
A_{gk}	Nurkkalevyn k pinta-ala

A_I	Rakennusosan ympärille kertyneen jään poikkipinta-ala
A_{ins}	Eristimen vaakasuoraan projisoitu pinta-ala ketjun akselin suuntaisessa pystytasossa
A_{pol}	Pylvään tai pylvään osan projisoitu pinta-ala kohtisuoraan tuulen suuntaa vastaan olevassa pystytasossa
A_{ref}	Rakenteen tai rakenneosan tuulenpaineen vaikutusala
B	Vähimmäisetäisyys esteestä
B^2	Taustapyörteiden vaikutusparametri / Taustakerroin
C	Vähimmäisetäisyys seinistä
C_c	Johtimen vastuskerroin / Muotokerroin
C_{Ic}	Jään peittämän johtimen Vastuskerroin
C_{ins}	Eristimen vastuskerroin
C_{pol}	Pylvään vastuskerroin
D	Reaktorin halkaisija (luku 5.3.3) Johtimen ulkopinnan halkaisija (luku 7.6.2) Liitososan väliaukon pituus (luku 7.7)
D_{ins}	Eristimen ulkohalkaisija
D_{tot}	Johtimen ekvivalentti halkaisija
D_v	Lähialueen etäisyys
E	Vähimmäisetäisyys metalliverkosta/säleiköstä (luku 3.4.1) Johtimen kimmokerroin (luku 7.7)
F	Kahden yhdensuuntaisen virtajohtimen välinen voima
$F_{2,max}$	Kaksivaiheisen oikosulun aiheuttama maksimivoima johtimessa
$F_{3,max,L2}$	Kolmivaiheisen oikosulun aiheuttama maksimivoima sisemmässä johtimessa
$F_{3,max,L1}, F_{3,max,L3}$	Kolmivaiheisen oikosulun aiheuttama maksimivoima uloimmissa johtimissa
F_d	Oikosulkuvirran tukirakenteille aiheuttava maksimivoima
F_m	Oikosulun aiheuttama staattinen maksimivoima johtimessa
F_{Rd}	Tukieristimen pistekuorman kestävyys
F_w	Ristikkorakenteen tuulikuorma
G_c	Johtimen rakenteellinen kerroin / Jännekerroin
G_{Ic}	Vastuskerroin
G_{ins}	Eristimen rakenteellinen kerroin
$G_{k,j}$	Epäedullisen vaikutuksen aiheuttamat pysyvät ominaiskuormat
G_{pol}	Pylvään rakenteellinen kerroin
H	Vähimmäiskorkeus
H'	Sallitun alueen yläpuolella sijaitsevien jännitteisten osien vähimmäisetäisyys ympäröivän aidan luona
I	Jääkuorma pituusyksikköä kohden
I_v	Tuulenpuuskien intensiteetti

J	Johtimen poikkileikkauspinnan neliömomentti
K_{FI}	Kuormakerroin
L	Johtimien tukipisteiden välinen etäisyys (luku 7.6) Johtimen pituus (luku 7.7)
ΔL	Siirtymä
L_1, L_2	Vierekkäisten jänneväljen mitat
L_{ins}	Eristimen tehollinen pituus
L_m	Kahden vierekkäisen jänteen keskipituus
$L(z)$	Tuulenpyörteen ulottuvuus
M_{pl}	Plastinen momentti
M_{el}	Kimmainen momentti
N	Vähimmäisetäisyys (luku 3.4.1) Normaalivoima (luku 7.7)
O	Vähimmäisetäisyys suojuksista
P	Esijännitysvoima
$Q_{k,l}$	Määrävä muuttuva ominaiskuorma
$Q_{k,j}$	Muut samanaikaisesti muuttuvat ominaiskuormat
Q_I	Tukirakenteelle jäätä aiheutuva pystykuorma
Q_{Wins}	Eristimien tuulikuorma
Q_{Wpol}	Putkipylvään tuulikuorma
Q_{Wc}	Johtimien tuulikuorma
R^2	Resonanssivasteen vaikutusparametri / Resonanssivastekerroin
T	Vähimmäisetäisyys ajoneuvosta
ΔT	Lämpötilan muutos
U_m	Suurin käyttöjännite
$U1$	Tuleva jännite
$U2$	Lähtevä jännite
V_F	Johtimen ominaisvärähtelyn vaikutukset huomioon ottava kerroin
V_r	Epäonnistuneesta kolmivaiheisesta pikajälleenkytkennästä aiheutuvan rasituslisän huomioon ottava kerroin
V_σ	Järjestelmän dynaamiset ominaisuudet huomioon ottava kerroin
W_m	Johtimen taivutusvastus

Latinalaiset pienet kirjaimet

a	Johdinten välinen kohtisuora etäisyys
b_i	Yksittäisen sauvan i leveys
c_{dir}	Suuntakerroin
c_f	Voimakkerroin
$c_{f,0}$	Ristikkorakenteiden voimakkerroin ilman päätevaikutuksia

c_o	Pinnanmuotokerroin
c_r	Rosoisuuskerroin
c_{season}	Vuodenaikakerroin
$c_s c_d$	Rakennekerroin
d	Ristikon poikkileikkauksen vaakamitta
d_c	Johtimen halkaisija
d_I	Jään paksuus
f	Verkon taajuus
f_c	Johtimen ominaistajuus
i_b, i_2	Samansuuntaisten johdinten virtojen hetkellisarvot
i_{p2}, i_{p3}	Samansuuntaisten johdinten virtojen maksimiarvot
k_l	Pyörteisyyserroin
k_p	Huippuarvokerroin
k_r	Maastokerroin
l	Ristikon pituus
l_i	Yksittäisen sauvan i pituus
m'	Johtimen massa pituusyksikköä kohden
n	Johtimien tai kiskojen lukumäärä
q	Plastisuuskerroin
q_p	Puuskanopeuspaine
s	Kiskon ainevahvuus
z	Rakenteen korkeus maan pinnasta
z_0	Rosoisuusmitta
$z_{0,II}$	Vertailuarvo, maastoluokka II
v_b	Tuulennopeuden perusarvo
$v_{b,0}$	Tuulennopeuden modifioimaton perusarvo
v_m	Tuulennopeuden modifioitu perusarvo

Kreikkalaiset isot kirjaimet

Λ	Suhteellinen vaimennuskerroin
$\Psi_{0,i}$	Kuormanyhdistelykerroin
Ψ_λ	Päätevaikutuskerroin

Kreikkalaiset pienet kirjaimet

α	Kiskon kiinnitystavan huomioon ottava kerroin (7.6) Pituuden lämpötilakerroin (luku 7.7)
β, γ	Kiskon kiinnitystavan huomioon ottava kerroin
γ_P	Esijännitysvoiman osavarmuusluku
σ_v	Turbulenssin keskihajonta
σ_m	Dynaaminen johdinrasitus

$\sigma_{m,stat}$	Staattinen johdinrasitus
$\sigma_{0,2}$	Johtimen myötölujuus
λ	Tehollinen hoikkuus
ρ_a	Ilman tiheys
ρ_I	Jään tiheys
φ	Eheyssuhde

1 JOHDANTO

Kaikkien hyvinvointiyhteiskuntien toiminta perustuu energian käyttöön ja alati kasvavan energiantarpeen vuoksi sitä on pystyttävä tuottamaan monella tapaa. Käytännössä energiantuotannolla tarkoitetaan luonnossa esiintyvän energian muuttamista erilaisilla prosesseilla hyödynnettävään muotoon, eli sähköön. Energiaa voidaan tuottaa esimerkiksi vesi- tai ydinvoimalaitoksessa, josta sitä siirretään sähköverkon kautta kuluttajille. Tämän kaiken on tapahduttava mahdollisimman luotettavasti ja häiriöttä. Lisäksi sähköä on tunnetusti hankala varastoida, mikä puolestaan asettaa sähkövoimajärjestelmälle omat haasteensa. Järjestelmän vaatimukset voidaan jakaa sähköisiin ja mekaanisiin vaatimuksiin, joista jälkimmäinen kiinnostaa tässä työssä.

Sähköverkko muodostuu voimajohdoista ja sähköasemista. Sähkönsiirtorakenteiden tehtävänä on kannatella sähköä siirtäviä johtimia ja kestää kaikki niihin kohdistuvat mekaaniset kuormitukset. Ne eroavat luonteeltaan tavanomaisista rakennuksista. Suunnittelussa tulee vastaan kuormia, joita ei normaalissa rakennesuunnittelussa esiinny. Näitä ovat oikosulku- ja kytkentävoimat, jotka aiheutuvat sähkömagnetismista ja sähkölaiteista. Lisäksi luonnonkuormat, kuten tuuli ja jää, aiheuttavat rakenteisiin kuormia, joiden määrittämiseen ei suoraan Eurokoodissa oteta kantaa. Sähkönsiirtorakenteita voidaanakin hyvällä syyllä pitää rakennesuunnittelussa erikoisrakenteina.

Sähkönsiirtorakenteiden suunnittelusta tuntuu olevan vähän osaamista ja se on keskittynyt kapealle sektorille. Tämä on myös keskeinen syy sille, miksi työ on päätetty tehdä. Koska aihe liittyy keskeisesti myös sähkötekniikkaan, on koettu aiheelliseksi käsitellä sähkövoimajärjestelmän perusteita ja etenkin sähköasemien toimintaa. Tarkoituksena on ollut laatia opus, joka antaa perusteet sähkönsiirrosta, sähkönsiirtorakenteista, niitä koskevista standardeista sekä niiden suunnittelusta ja mitoituksista.

Työn päätavoitteena on selvittää sähkönsiirtorakenteille aiheutuvat kuormitukset ja mitä suuruusluokkaa ne ovat. Osa kuormista määritetään laskennallisesti, osa taulukoiden avulla ja osa tulee laitevalmistajilta. Määritettiin kuormat miten tahansa, rakenteista vastaavan suunnittelijan tulisi ymmärtää mistä kuormat aiheutuvat. Toisena tavoitteena on selvittää suunnittelun erityiskysymyksiä, jotka rakennesuunnittelijan on tarpeellista tietää sähkönsiirtorakenteista. Tarkoituksena ei ole kehittää uusia ratkaisuita tai laskentamenetelmiä, vaan koota keskeisimmät aiheeseen liittyvät asiat. Lisäksi on yritetty pohtia joitain mitoituksiin liittyviä suunnitteluperiaatteita, joihin ei asianomaisissa standardeissa ole otettu kantaa. Mainittakoon muun muassa kuormanyhdistelykertoimet.

Pöyry Finland Oy:n intressit ovat pääasiassa sähköasemissa. Kiinnostuksen kohteena ovat erityisesti ulos rakennettavat sähköasemat eli ulkokytkinlaitokset, johon myös

tämä työ keskittyy. Lisäksi voimajohtoja ja niiden suunnitteluun liittyviä asioita käsitellään, mutta työn laskennallinen osuus keskittyy vain ulkokytkinlaitoksiin.

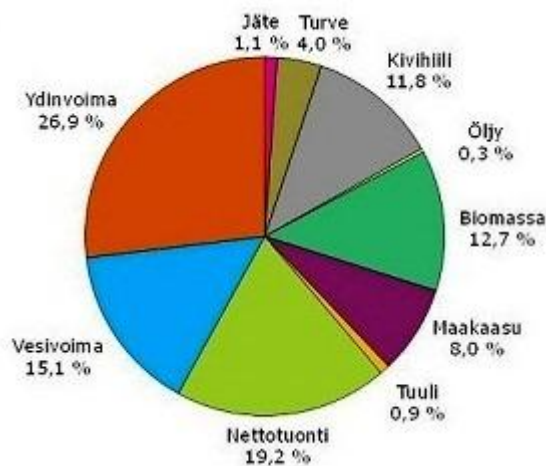
Tutkimusmenetelmänä on käytetty pääosin kirjallisuusselvitystä. Kirjallisuudessa sähkönsiirtorakenteiden mekaanisista kuormista ja niiden vaikutuksista rakenteisiin on kuitenkin niukasti tietoa. Tämän vuoksi kirjallisuuden tukena on käyty keskusteluja sekä pidetty haastatteluja alan asiantuntijoiden kanssa. Sähkönsiirtotekniikan, sähköasemien ja voimajohtojen tiedonhankintaan käytettiin apuna kirjallisuutta sekä sähköalan yritysten ohjeita ja esitteitä. Kuormien määrittämiseen on käytetty alan standardeja ja ohjeita.

2 YLEISTÄ SÄHKÖNSIIRTOTEKNIIKASTA

Tämän luvun tarkoituksena on luoda katsaus koko maan kattavaan voimansiirtojärjestelmään ja kertoa lyhyesti mistä sähkönsiirrossa on laajemmassa mittakaavassa kysymys. Kaikki sähkönsiirtoon tarkoitetut rakenteet ovat osa tätä järjestelmää, minkä vuoksi on hyvä tietää pääperiaatteet sähköntuotannosta ja siirrosta.

2.1 Sähköntuotanto

Teollisuusmaiden ja hyvinvointiyhteiskuntien elintaso perustuu energian käyttöön. Maailmassa on useita eri energiamuotoja, mutta niitä ei pystytä sellaisenaan hyödyntämään. Energiantuotannossa sellaista energiaa, jota pystytään muuttamaan käytettävään muotoon, nimitetään primäärienergiaksi. Primäärienergiaksi luetaan kaikki polttoaineet, kuten öljy ja kivihiili, ydinvoima sekä uusiutuvat energialähteet, joista tärkeimpänä vesi- ja tuulivoima. Primäärienergia muutetaan voimalaitoksissa generaattoreiden avulla sähköksi, jota yhteiskunta sitten pystyy hyödyntämään eri tarpeisiin. Suomessa sähköntuotanto on jakautunut monipuolisesti kuvan 2.1 osoittamalla tavalla.



Kuva 2.1. Sähkön hankinta energialähteittäin vuonna 2013. (Energiateollisuus [viitattu 14.1.2014])

Kuvasta nähdään, että tärkeimpiä sähkön tuottajia ovat ydin- ja vesivoima, kivihiili, maakaasu, puupolttoaineet ja turve. Merkille pantavaa on myös se, että yli 20 % sähköenergiasta tuodaan Suomeen muualta. (Elovaara & Haarla 2011a; Energiateollisuus [viitattu 14.1.2014])

jakeluverkot 20, 10, 1 tai 0,4 kV jännitteillä. Lisäksi alueverkkoyhtiöillä ei ole samanlaista maantieteellistä vastuualuetta kuin jakeluverkkoyhtiöillä, vaan niiden päätehtävänä on siirtää sähköä omistajiensa muuntoasemille, josta jakeluverkot siirtävät sähköä edelleen pienemmillä jännitteillä muun muassa kotitalouksille. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 58-62; Energiateollisuus [viitattu 16.1.2014])

2.3 Sähkönsiirto ja -jakelu

Sähkövirta on elektronien liikettä, jonka aiheuttaa potentiaaliero eli jännite. Sähkövoimatekniikassa virtaa siirretään johtimilla, jotka ovat pääasiassa alumiinipitoisia. Elektronien osuessa johtimen atomeihin, alkavat ne värähtelemään, mistä muodostuu lämpöenergiaa. Sähkönsiirron yhteydessä tämä muodostunut lämpö on hukkaenergiaa, josta käytetään myös nimitystä linjahäviö. Lisäksi kun sähkötekniikasta tiedetään johtimen pituuden olevan suoraan verrannollinen johtimen resistanssiin, niin pitkällä johtimilla linjahäviöt ovat todella suuret. Sähkönsiirron kannalta tämä on ongelmista, koska tavoitteena on mahdollisimman suuri hyötysuhde. Ongelma on ratkaistu siirtämällä mahdollisimman pientä virtaa, jolloin jännitettä on puolestaan nostettava. Tämä perustuu muuntajan käyttöön, mitä on tarkemmin selitetty kohdassa 5.2.1.

Suomessa sähkönsiirrosta vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid, noin 10 alueverkko- ja 80 jakeluverkkoyhtiötä (Energiavirasto [viitattu 17.3.2014]). Kantaverkon omistava Fingrid huolehtii verkon kehittämisestä, valvonnasta ja ylläpidosta. Yhtiön omistaa valtio (55,52 %), Huoltovarmuuskeskus (15,41 %) ja lähinnä eri vakuutusyhtiöistä koostuva ryhmä (29,07 %) (Fingrid [viitattu 15.1.2014]). Varsinaisesta jakelusiirrosta vastavat verkkoyhtiöt. Nämä sähköyhtiöiden hallitsemat verkot toimivat 0,4-70 kV jännitteellä. Kotitaloudet saavat sähkönsä jakeluverkoista ja teollisuus, kaupat, palvelut sekä maatalous joko kanta-, alue- tai jakeluverkosta (Energiateollisuus [viitattu 16.1.2014]).

Sähköverkon tehtävä on siirtää sähköä voimalaitoksista kuluttajille. Sähköä on kuitenkin tunnetusti hankala varastoida, mutta tarjonnan on silti vastattava kysyntää mahdollisimman tarkasti. Lisäksi on oltava tietty määrä reserviä esimerkiksi kulutuspiikkien ja vikojen varalta. Tämä tekee verkon hallitsemisesta haastavan ja monimutkaisen tehtävän. Sähköverkko koostuukin monista eri komponenteista. Sen pääosia ovat generaattorit, muuntajat, johdot, kompensointilaitteet ja (sähköiset) kuormat (Elovaara & Haarla 2011a, s.97). Usein puhutaan myös sähkövoimajärjestelmästä, joka koostuu voimalaitoksista, kuormista ja niitä yhdistävistä johdoista. Sähköä tuotetaan suurissa voimalaitoksissa, jossa generaattorin avulla mekaanista energiaa muutetaan sähköenergiaksi. Vesi- ja tuulivoimalaitoksissa mekaaninen energia saadaan suoraan hyödyntämällä luonnon omia virtauksia. Useimmat tämän päivän voimalaitoksista ovat niin sanottuja lämpövoimalaitoksia. Ne tuottavat lämpöenergiaa, joka muutetaan mekaaniseksi energiaksi ja edelleen sähköenergiaksi generaattoreiden avulla. Näissä prosessi etenee yleensä niin, että vettä lämmitetään korkeapaineiseksi höyryksi polttoaineen avulla, mikä saa höyryturbiinin akselin pyörimään muodostaen mekaanista energiaa. Voimalaitosten generaattoreista sähkö syötetään muuntajien kautta kantaverkon suurjännitejohtoihin.

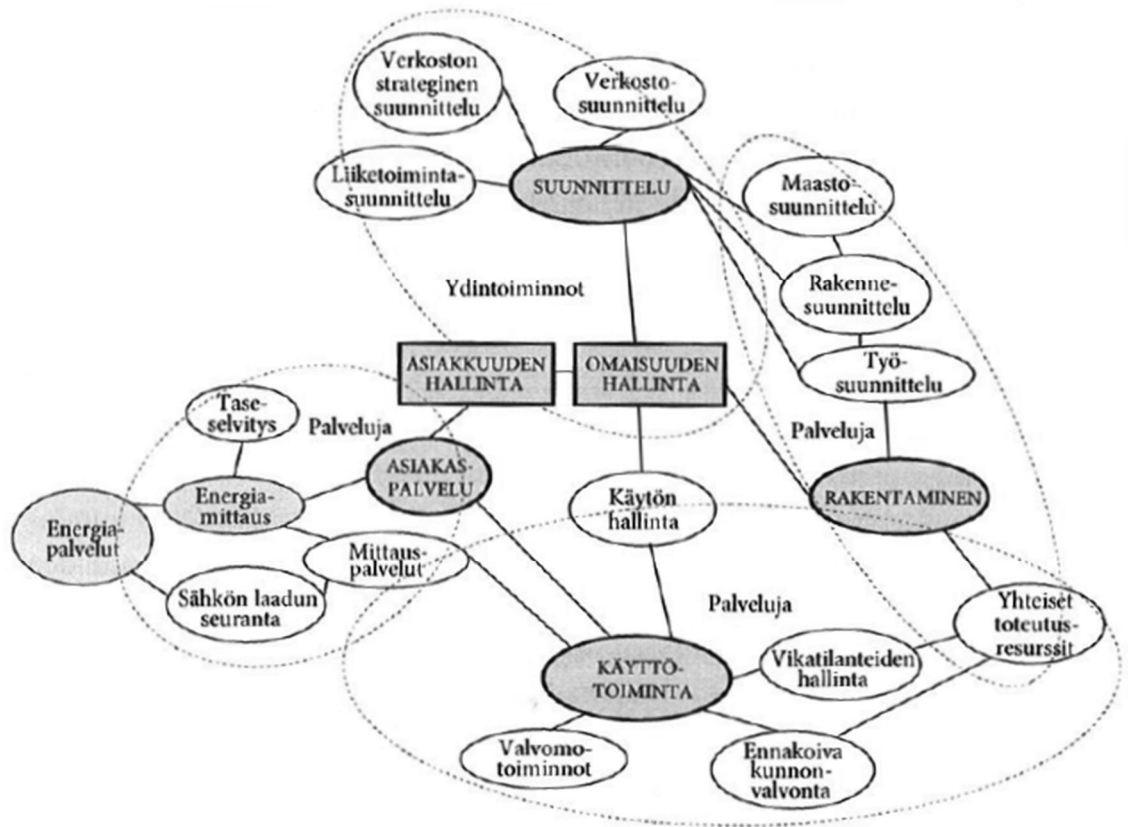
Kantaverkkoon yhdistyy sähköasemia ja jakelumuuntajia, joissa erisuuruiset jännitejohdot yhtyvät. Ne ovat sähköverkon solmukohtia, joissa sähköä muunnetaan ja siirretään eteenpäin sopivilla jännitteillä. Suurjänniteverkot ovat toteutettu ilmajohtoina, koska ne ovat huomattavasti halvempia kuin maakaapelit. Keski- ja pienjänniteverkosta 10-30 % on toteutettu maakaapeilla. Maakaapeleiden käyttö on kuitenkin alkanut kasvaa, mitä ainakin osittain selittää viime vuosina myrskyistä aiheutuneet tuhot. (Elovaara & Haarla 2011a, Luku 1)

Sähköisten kuormien ymmärtäminen vaatii perusteellisempaa sähkötekniikkaan ja sähkövoimajärjestelmään paneutumista, mikä ei kuulu tämän työn sisältöön. Mainittakoon kuitenkin, että verkostolaskennassa kuormat kuvataan jännitteestä tai taajuudesta riippuvina suureina tai vakiotehokuormina, jotka eivät muutu jännitteen ja taajuuden muuttuessa (Elovaara & Haarla 2011a, s. 139).

Tyypillinen sähkönsiirtoprosessi on seuraavanlainen: voimalaitoksen generaattori tuottaa sähköä 10,5 kV jännitteellä, jonka muuntaja muuntaa 220 kV kantaverkkoon. Kantaverkossa sähköä siirretään voimajohdoissa pitkiä etäisyyksiä lähemmäs loppukäyttäjää. Alueverkon liittyessä kantaverkkoon jännite lasketaan muuntoasemalla 110 kV, ja edelleen lähempänä kotitalouksia 20 kV keskijänniteverkkoa syöttävällä sähköasemalla. Lopulta liittyessään pienjänniteverkkoon pylväsmuuntaja laskee jännitteen kotitalouksien käyttämälle 0,4 kV jännitteelle. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 55; Lakervi & Partanen 2008, Luku 7)

2.4 Rakennesuunnittelu osana sähköverkkotoimintaa

Suomen sähköverkon rakenne poikkeaa muista maista siten, että sillä ei ole yhtä pääomistajaa, vaan omistajuus on jakautunut eri tahoille. Sähköverkon omistavilla yrityksillä (Fingrid sekä alue- ja jakeluverkkoyhtiöt) on useita eri velvoitteita, joihin muun muassa rakentaminen ja siihen liittyvät toiminnot kuuluvat (ks. kuva 2.3).



Kuva 2.3. Rakennesuunnittelu osana verkkoyhtiöiden toimintaa. (Lakervi & Partanen 2008, s. 22)

Suomen sähköasemahankkeissa tilaajana toimii kantaverkko- tai sähköverkkoyhtiö. Tilaaja toimii hankkeissa usein myös rakennuttajana. Rakennuttaja valitsee hankkeeseen pääurakoitsijan, jonka tehtävänä on sähköaseman rakentaminen. Usein pääurakoitsija ulkoistaa maarakennustyöt ja rakennesuunnittelun. Tämä pätee varsinkin suuremmissa hankkeissa ja etenkin, jos rakennetaan niin sanottu GIS-laitos. Pienemmän mittakaavan hankkeissa rakennesuunnittelua ei välttämättä ulkoisteta ollenkaan.

3 ERISTYSAINEET JA -RAKENTEET

Sähkönsiirtoverkko koostuu komponenteista, joilla on niin sähköisiä kuin mekaanisia tehtäviä. Ehkä tärkein tällainen komponentti on eristin, jota käytetään niin voimajohtoisissa kuin sähköasemillakin. Eristimen tehtävänä on erottaa toisistaan sähköä siirtävät osat muista rakenteista sekä rajoittaa verkossa esiintyviä ylijännitteitä. Voimajohtojen johtoja ei kiinnitetä pylvääseen suoraan, vaan kiinnitys tapahtuu eristimien välityksellä. Samoin toimitaan sähköasemilla, jossa johtimet eristetään tukirakenteista tukieristimillä. Lisäksi useimmat sähköasemien laitteet sisältävät itsessään yhden tai useamman eristimen. Koska eristimiä käytetään kaikissa sähkönsiirtoverkon rakenteissa, myös rakennesuunnittelijan on hyvä tietää jotain niiden toiminnasta ja ominaisuuksista.

Tämän luvun tarkoituksena on kertoa eristysaineista ja -rakenteista, mitä eristysaineita käytetään ja minkälaisia eristimiä on olemassa. Näiden asioiden ymmärtämisen vuoksi tähän työhön on sisällytetty lyhyt osuus suurjännitetekniikasta. Lisäksi suurjännitesähköasennusten tulee täyttää vähimmäisetäisyydet, jotka määräytyvät jännitearvojen mukaan (SFS 6001 2009, s 34.). Tämä taas vaikuttaa tukirakenteiden sijoitteluun sähköasemien kytkinkentillä.

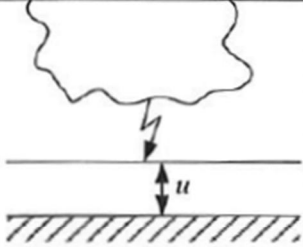
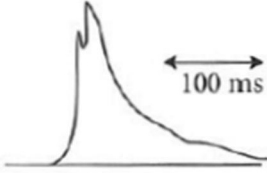
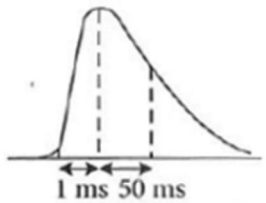
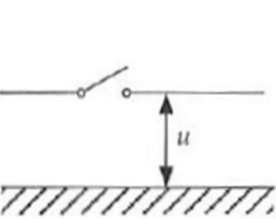
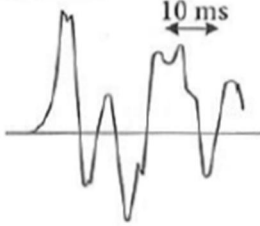
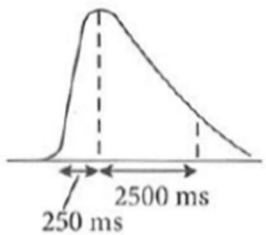
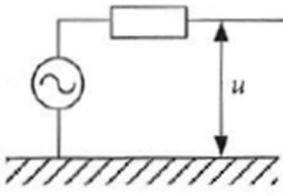
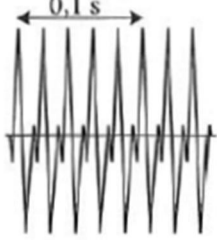
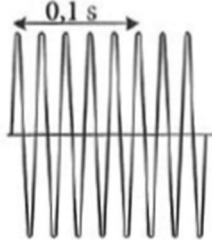
3.1 Suurjännitetekniikka

Suurjännitetekniikka käsittää verkossa esiintyvät jänniterasitukset, eristysrakenteiden jännitelujuuden, ylijännitesuojauksen ja eristyskoordinaation sekä suurjännitekoestus- ja mittaustekniikan (Partanen [viitattu 28.2.2014]). Tässä luodaan vain lyhyt katsaus jännitteisiä johtimia ympäröivien eristysrakenteiden jännitekestoisuuteen.

Sähköverkossa esiintyy ylijänniterasituksia, joiden suuruutta pyritään rajoittamaan (Partanen [viitattu 28.2.2014]). Ne määrittävät verkon eristysmitoituksen. Jänniterasitukset voidaan jakaa kahdella tavalla: ensimmäisen määritelmän mukaan ylijännitteet jaetaan *jatkuvaan käyttöjännitteeseen* ja *lyhytaikaisiin jännitteisiin*. Näistä jälkimmäisellä tarkoitetaan jännitettä, joka ylittää eristysvälin suurimman sallitun käyttöjännitteen huippuarvon.

Toisen määritelmän mukaan ylijännitteet jaetaan voimakkaasti vaimeneviin ja lyhytaikaisiin ylijännitteisiin eli *transienttiylijännitteisiin* sekä vaimenemattomiin tai heikosti vaimeneviin ylijännitteisiin eli *pientaajuisiin ylijännitteisiin*. Transienttiylijännitteiden kesto-aika on lyhyt, vain muutamia millisekunteja. Ne voidaan edelleen jakaa loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin transienttiylijännitteisiin niiden jänniterasituksen kesto- ja vaimennusajan mukaan. Loivat transienttiylijännitteet syntyvät tyypillisesti kytkentätoimenpiteistä, kuten virtapiirin avaamisesta tai sulkemisesta katkaisijalla. Jyrkät transienttijännitteet syntyvät usein ukkosen synnyttämien salamanpurkauksien seu-

rauksesta. Pientaajuiset ylijännitteet ovat puolestaan jaksollisia ja selvästi pidempikes-
toisia. Ne syntyvät pääasiassa kytkentäoperaatioiden seurauksena ja verkon tilan muu-
toksista. Kuvassa 3.1 on esitetty ylijännitelajit ja niiden luokittelu. Ylijännitteen aiheut-
tajaperusteisesta luokittelusta on nykyään kuitenkin luovuttu, koska se ei korreloi hyvin
ylijännitteen nousunopeuden ja kestoajan välisen riippuvuuden kanssa. (Elovaara &
Haarla 2011b, s. 11-28)

		Ylijännitteen aiheuttaja	Ylijännitteen muoto	Testijännitteen muoto
Lyhytaikainen	Ilmastollinen syy			
	Kytkentäilmiö			
Pitkäaikainen				

Kuva 3.1. Ylijännitelajit ja niiden testijännitemuodot. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 12)

Ylijännitteet voidaan jakaa myös sen perusteella, minkälaiseen eristysväliin ne vai-
kuttavat. Näitä ovat (1) vaiheen ja maan väliset, (2) vaiheiden väliset ja (3) pitkittäis-
suuntaiset avausvälien ylitse vaikuttavat ylijännitteet. Tämän työn ylijänniteasiat koske-
vat pelkästään *vaiheen ja maan välisiä ylijännitteitä*. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 13)

Ylijännitesuojauksen tarkoituksena on pyrkiä rajoittamaan verkossa esiintyvien yli-
jännitteiden suuruutta, jotta ne eivät vaarantaisi verkon häiriötöntä käyttöä ja vahingoit-
taisi sähköasemien laitteita. Tässä työssä ei käsitellä tarkemmin ylijännitesuojauksessa
sovellettavia menetelmiä. Todetaan kuitenkin, että käytössä olevia suojausmenetelmiä
ovat muun muassa avojohtojen ukkosjohtimet, pylväsmadoitukset, suojakipinävälit ja
venttiilisuojat. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 29-40)

3.2 Eristysrakenteiden jännitelujuus

Eristysrakenteella on sähköinen jännitelujuus, joka tarkoittaa sen kykyä kestää tietty jänniterasitus tietyllä todennäköisyydellä ilman haittaa tai vaurioita tuottavia sähköpurkauksia. Tämän lisäksi eristysrakenteella on usein myös mekaaninen tehtävä eli jännitteiden osien tukeminen. (Partanen [viitattu 28.2.2014])

Eristysrakenteeseen kohdistuvan jänniterasituksen kasvaessa tarpeeksi suureksi, tapahtuu purkauksia, jotka tekevät eristysvälin täysin tai osittain johtavaksi. Yleensä puhutaan täydellisestä purkauksesta ja osittaispurkauksesta. Osittain johtavassa tapauksessa purkaus ei yhdistä täydellisesti elektrodeja, minkä vuoksi ilmiöstä käytetään nimitystä *osittaispurkaus*. Osittaispurkauksessa elektrodit eivät yhdisty täydellisesti. *Täydellinen purkaus* tapahtuu usein yhtä eristettä sisältävässä elektrodivälissä, kuten ilmaeristeissä karkikipinävälissä, jolloin elektrodien jännite äkillisesti romahtaa ja virta kasvaa voimakkaasti. Eräs täydellisen purkauksen erityistapaus on niin sanottu *ylilyönti*, joka tapahtuu kahden eri eristeen rajapinnassa. Se on tyypillinen ilmiö esimerkiksi posliinista tai lasista valmistetulle ilman ympäröimälle eristimelle, jolloin kaksi eristysmateriaalia on siis posliini ja ilma tai lasi ja ilma. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 41-42)

Läpi- tai ylilyönnin vaikutusten mukaan eristeenä käytettävät eristysrakenteet jaetaan joko *palautuviin* tai *palautumattomiin eristykseen*. Palautuvien eristysten ominaisuudet eivät juuri muutu läpilyönnin vaikutuksesta. Niitä ovat esimerkiksi ilma ja muut kaasut. Palautumattomat eristykset puolestaan menettävät lujuusominaisuutensa lähes kokonaan. Näitä ovat taas (lähes) kaikki kiinteät eristeet. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 42)

3.2.1 Kaasut eristeenä

Ilma on sähkönsiirrossa eniten käytetty eriste. Ilmaeristeeksi luetaan pelkästään ilman jännitelujuuteen perustuvat elektrodivälit sekä rakenteet, joissa elektrodiväliin on sijoitettu ilma ja kiinteä eriste rinnakkain. Esimerkiksi termi ilmajohto viittaa juuri johtimen eristysmateriaaliin. Ilmaeristysrakenteiden jännitelujuuteen vaikuttaa muun muassa tassa- ja vaihtojännite, jännitteen jyrkkyys, eristeen laji, elektrodivälin suuruus ja sääolosuhteet ulkona oleville eristimille.

Ilma on usean kaasun muodostama seos. Tästä huolimatta kirjallisuudessa siitä ei käytetä termiä kaasueriste, vaan ilmaeriste. Käytetyin varsinainen kaasueriste on rikkiheksafluoridi (SF_6). Sen käyttö mahdollistaa pienempien ja tehokkaampien sähköasemien rakentamisen ilmaeristettyihin sähköasemiin verrattuna. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 46-50)

3.2.2 Kiinteät ja nestemäiset eristeet

Kaasut, kuten ilma ja rikkiheksafluoridi, eivät ole kiinteitä eristeitä. Niitä ei voi sen takia käyttää esimerkiksi sähköaseman laitteiden kannattamiseen. Tätä varten on olemassa niin sanottuun tekniseen käyttöön soveltuvia eristimiä, joita käytetään muun muassa

ilmajohtojen ja sähköaseman laitteiden kannattamiseen. Eristimen pelkkä sähköinen lujuus ei riitä, vaan niiltä vaaditaan myös mekaanista, kemiallista ja termistä kestävyyttä. Lisäksi niillä tulee olla hyvä lämmönjohtavuus ja valokaaren sietokykyä. Näitä tarpeita varten on kehitetty eristeitä, jotka voidaan jakaa seuraaviin luokkiin (Elovaara & Haarla 2011b, s. 54):

- luonnon epäorgaaniset eristeet
- synteettiset epäorgaaniset eristeet
- luonnon orgaaniset eristeet
- synteettiset orgaaniset eristeet.

Luonnon epäorgaanisia eristeitä ovat kvartsi ja kiille. Niiden käyttö on kuitenkin ilmeisen vähäistä, sillä kirjallisuudesta ei löytynyt mitään käyttökohteita kummallekaan materiaalille. Myöskään aihetta käsittelevissä standardeissa niistä ei ollut mainintaa.

Synteettisiä epäorgaanisia eristeitä ovat esimerkiksi lasi ja posliini. Ne sopivat kaasu tiiviytensä, keveytensä ja korroosiokestoisuutensa vuoksi hyvin ulkoasennuksiin. Lasia käytetään erityisesti lautaseristimissä ja posliinia lähes kaikissa ulkoeristyssovelluksissa. Eristyslasi on niin sanottua karkaistua lasia, jonka pintakerrokseen on luotu esijännitys. Tämä parantaa sen mekaanista lujuutta. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 55)

Luonnon orgaanisia eristeitä ovat mineraaliöljy, paperi ja näiden yhdistelmät. Mineraaliöljy ja paperi ovat vanhimpia käytettyjä eristysmateriaaleja. Öljyllä on edelleen keskeinen asema esimerkiksi teho- ja mittamuuntajien eristeinä, sillä ne pystyvät siirtämään tehokkaasti eristysrakenteesta ulos lämpöä. Ne ovat kuitenkin alttiita heikkeneeseen nopeasti. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 56)

Synteettiset orgaaniset eristeet ovat yleistyneet viimeisten vuosien aikana. Niitä ovat polyeteenit (PE), polyvinyylikloridi (PVC), silikonikumi, etyleenipryleenikumi (EPR), epoksimuovit (EP), polyuretaanimuovit (PUR), klooratut bifenyylit (PCB) ja silikoniöljyt. PE-eristettä käytetään erityisesti kaapeleissa. Ne ovat kevyitä ja nopeasti asennettavia, mutta alttiita kosteuden aiheuttamille ongelmille ja muovin valmistuksessa rakenteeseen syntyville mikro-onkaloille. PVC-eristeet eivät ole saavuttaneet samanlaista suosiota kuin PE-eristeet niiden keskinkertaisten sähkölujuusominaisuuksien vuoksi. PVC on kuitenkin halpa materiaali, minkä vuoksi sitä edelleen käytetään. Silikonikumi ja EPR-päällikuorella varustetut komposiittieristimet tai polymeerieristimet ovat yleistymässä kovaa vauhtia sekä eristinketjuissa että laite-eristyksissä, kuten katkaisijoissa. Niiden etuja ovat keveys ja suuri vetolujuus. Varsinkin silikonikumien sähköiset ominaisuudet ovat erinomaiset, mekaanisten ominaisuuksien ollessa kohtuulliset. EP-eristeet eivät kuulu sähköisiltä ominaisuuksiltaan parhaimpiin eristeisiin. Mekaanisten ja termisten ominaisuuksien vuoksi ne ovat kuitenkin pysyneet kilpailukykyisinä. Myös niiden valokaaren kestävyys on hyvä. Epoksimuoveja käytetään erityisesti keskijännitteillä. PUR-eristeet vastaavat sähköisiltä ominaisuuksiltaan PE-eristeitä, mutta niiden mekaaninen kestävyys on huono. PCB-eristeitä on käytetty kondensaattoreissa ja sisätiloihin asennetuissa muuntajissa. Ne ovat kuitenkin myrkyllisiä ja aiheuttavat ympäristöhaittoja, minkä vuoksi niiden käytöstä on luovuttu. Silikoniöljyt ovat ominaisuuksiltaan hyvin samanlaisia kuin silikonikumi. Niillä voidaan esimerkiksi korvata PCB-eristeet

muuntajaeristeinä, mikä kuitenkin on taloudellisesti kalliimpi vaihtoehto. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 55-58)

3.3 Eristimet

Tekniseen käyttöön soveltuvia eristimiä on useita erilaisia. Ne voivat erota muun muassa materiaalin, mekaanisen kestävyys- tai käyttötarkoituksen mukaan. Eristimen pituus riippuu johtimen jännitteestä. Mitä suurempi jännite, sitä suuremman valokaaren se aiheuttaa. Eristeen pituus on taas suoraan verrannollinen valokaaren pituuteen. Karkeasti voidaan sanoa, että 110 kV ilmajohdon eristinketjun pituus on 1 metri, 220 kV 2 metriä ja 400 kV 4 metriä (Työsuojeluhallinto 2011, s. 5).

Rakenteellisesti eristin voi olla joko *tukieristin* tai *riippueristin*. Suomessa tukieristimiä käytetään yleensä enintään 52 kV johdoilla sekä sähköaseman laitteilla. Suuremmilla jännitteillä siirrytään yleensä lautaseristimistä koottujen eristinketjujen käyttöön. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 272-273) Kuvassa 3.2 on esitetty erilaisia yleisimpiä eristintyypppejä.



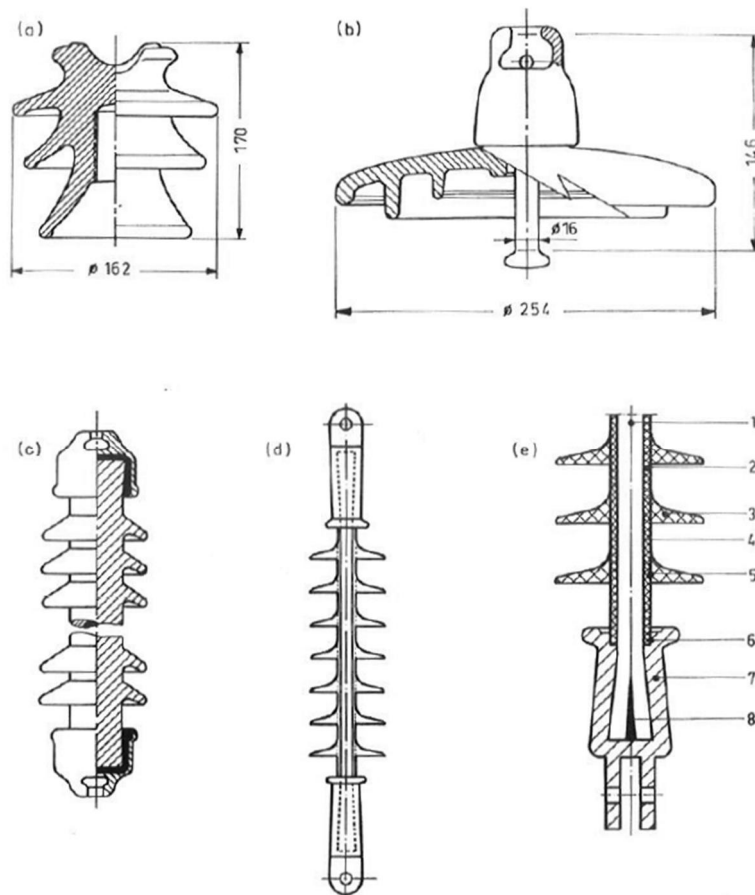
Kuva 3.2 Erilaisia eristimiä. Vasemmalta oikealle: suurjänniteilmajohdon riippueristin, 20 kV ilmajohdon tukieristin ja sähköasemilla käytettävä tukieristin.

Eristimet ovat erilaisia myös mekaanisilta ominaisuuksiltaan, sillä niiden tulee välittää eri kuormia käyttötarkoituksesta johtuen. Suurjännitteiset ilmajohdot ovat ripustettu pylväsrakenteisiin riippueristimillä, jolloin ne liikkuvat johdon mukana nivelellisesti. Ilmajohdot ovat köysiä, eivätkä ne aiheuta puristavaa voimaa, jolloin niiden tulee kestää vain vetoa. Sähköasemien ja keskijänniteverkon tukieristimet ovat puolestaan jäykästi kiinnitetty tukirakenteisiin, jolloin niiden tulee kestää myös taivutusta ja puristusta.

Keskijännitejohtojen tukieristiminä käytetään joko tappieristimiä (S-eristimet) tai huippu-uralla varustettuja tappieristimiä (SH-eristimet), jotka ovat nykyisin yleisimmin käytettyjä eristimiä. Molemmat tehdään yleensä posliinista, mutta niiden kiinnitysmee-

kanismi orteen on erilainen. Toisinaan tappieristinten sijaan käytetään myös massiivisia tukieristimiä. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 273)

Riippueristimistä käytetyimpiä ovat kapp- eli lautaseristimet, joita voidaan liittää toisiinsa joko hahlo-kieli- tai tappi-kuppi-liitoksella. Liitososat (kappa ja tappi) ovat metallia. Eristinyksikössä liitososien väliin jää eristysaineesta tehty laippa, jonka materiaalina käytetään lasia tai posliinia. Laippa kiinnitetään kiinnitysosiin muun muassa Portland-sementin avulla. Lautaseristimistä muodostuvien riippueristimien etuna tukieristimiin nähden on niiden suurempi mekaaninen lujuus. Lisäksi lautaseristimen etuna on, että johdolle asetetut sähköiset vaatimukset voidaan helposti täyttää liittämällä yhteen tarpeeksi monta eristintä. Kuitenkin niin, että johtojen ilmavälit sallivat liittämisestä aiheutuvan eristeen pitoisuuden kasvun. Yhdenlaisia riippueristimiä ovat myös sauvaeristimet, jotka ovat massiivisia posliinista valmistettuja riippueristimiä. Ne ovat kuitenkin verrattain kalliita ja niiden käyttö Suomessa on vähäistä. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 273) Kuvassa 3.3 on esitetty avojohdoissa tyypillisesti käytettyjä eristimiä.



Kuva 3.3. Avojohtoissa käytettyjä eristimiä. a) Eristin SH-24, b) lautaseristin, c) sauvaeristin, d) moniaine-eristin ja e) sen poikkileikkaus: 1) lasikuituinen sauva, 2) silikonipinnoite, 3) silikonikumilaipat, 4) kemiallinen sidos, 5) vulkanointi, 6) silikonipolymerikittaus, 7) päatekappa ja 8) kiila. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 275)

Sähköasemilla käytettävät tukieristimet eroavat yllä esitetyistä. Tukieristimet eroavat toisistaan lähinnä koon suhteen, riippuen siitä minkä suuruisia jänniteosia ne tukevat.

3.4 Vähimmäisetäisyydet

Sähköaseman jännitteisille osille on standardissa SFS 6001 (2014) määritetty vähimmäisetäisyydet, jotka määräytyvät eristystason mukaan. Eristystaso taas saadaan laitteen suurimmasta käyttöjännitteestä U_m ja/tai salama- tai kytkentäsyökyjännitteen mukaan (SFS 6001, s. 34). Käyttöjännite kuuluu jompaankumpaan seuraavista jännitealueista:

- $1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$ (Jännitealue 1)
- $U_m > 245 \text{ kV}$ (Jännitealue 2).

Turvaetäisyyden määrittämiseksi tulee ensin määrittää vähimmäisetäisyyden arvo N , joka riippuu laitteen käyttöjännitteestä. Mitä suurempi laitteen käyttöjännite, sitä suurempi vähimmäisetäisyys vaaditaan. Vähimmäisetäisyyksien arvot N ovat taulukoitu ja ne on esitetty liitteessä 1. Standardi määrittelee erityisolosuhteissa käytettyjä vähimmäisetäisyyksien kertoimia, mutta niitä ei käsitellä tässä työssä.

Näihin vähimmäisetäisyyksiin perustuu myös sähköaseman turvaetäisyydet ja kuljetusreitien mitat. Tilaaja voi projektikohtaisesti esittää käytettäväksi eri arvoja, mutta kuitenkin niin, että ne ovat vähintään tässä esitettyjen standardin vähimmäisetäisyyksien mukaiset.

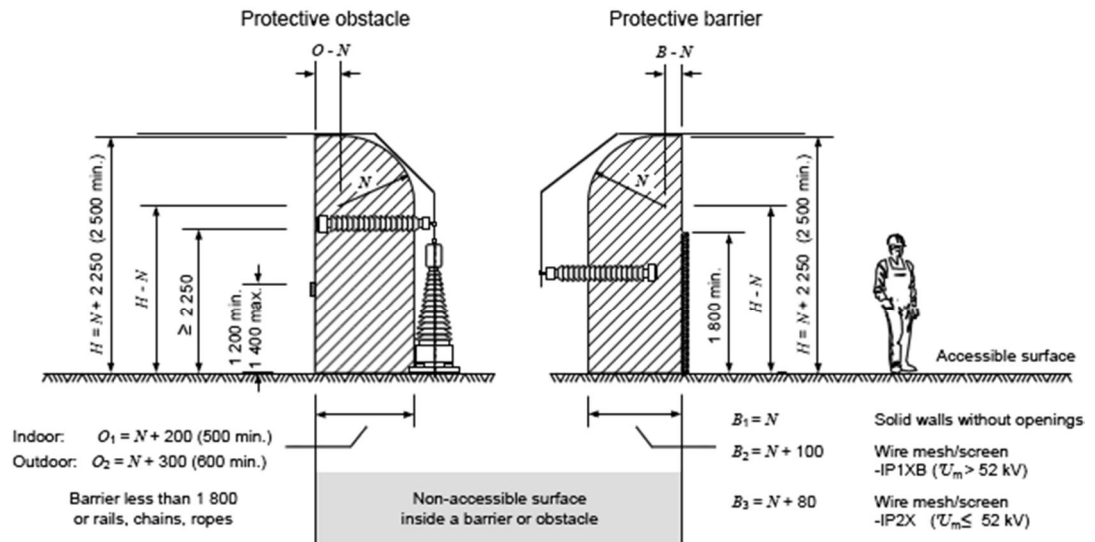
3.4.1 Turvaetäisyydet

Tässä käsitellään turvaetäisyyksiä koteloimattomille ulkoasennuksille, jotka ovat alttiina sään vaikutuksille ja/tai niiden jännitteisiä osia ei ole suojattu koskettamiselta. Käytännössä tämä koskee niin sanottuja ulkokytkinlaitoksia, jotka erityisesti tässä työssä kiinnostavat.

Pääsy laitteiston jännitetyöalueelle on rajoitettu, mutta kuitenkin niin, että käyttöön ja kunnossapitoon liittyvät kulkutarpeet on otettu huomioon. Mikäli turvaetäisyydet ovat riittämättömät, niin käytetään ympäröiviä aitoja ja kiinteitä suojuksia. Mastoja ja pylväitä ei sen sijaan tarvitse ympäröidä aidalla, jos laitteet eivät ole ihmisten ulottuvilla (ks. 3.4.1.7). (SFS 6001, s. 45)

3.4.1.1 Etäisyydet sähkötilan sisällä olevista suojuksista

Tähän on koottu laitteiston jännitteisten osien vähimmäisetäisyydet minkä tahansa suojuksen sisäpintaan (ks. kuva 3.4).



	Este	Suojus	
			Sallittu pinta
Sisätiloissa $O_1 = N + 200$ (min 500)		$B_1 = N$	Kiinteät, aukottomat seinät
Ulkotiloissa $O_2 = N + 300$ (min 600)		$B_2 = N + 100$	Metalliverkko/säleikkö IB1XB ($U_m > 52$ kV)
Alle 1800 mm korkea este tai kaide, ketju, köysi	Suojuksen tai esteen takana oleva tila, johon pääsy on kielletty	$B_3 = N + 80$	Metalliverkko/säleikkö IP2X ($U_m \leq 52$ kV)

Kuva 3.4. Kosketussuojaus suojuksien tai esteiden avulla sähkötiloissa. Mitat millimetreinä. (SFS 6001, s. 51)

Kiinteille, aukottomille ja vähintään 2000 mm korkeille seinille:

- $B_1 = N$.

Kiinteille, aukottomille ja vähintään 2000 mm seinille sekä kotelointiluokan IP1XB mukaisista metalliverkoille ja säleiköille (kun $U_m > 52$ kV):

- $B_2 = N + 100$ mm.

Kiinteille, aukottomille ja vähintään 2000 mm seinille sekä kotelointiluokan IP2X mukaisista metalliverkoille ja säleiköille (kun $U_m \leq 52$ kV):

- $B_3 = N + 100$ mm.

Lisäksi jännitteisten osien vähimmäiskorkeus suojusten sisäpuolella pitää olla:

- $\max(300 \text{ mm} + N; 800 \text{ mm})$.

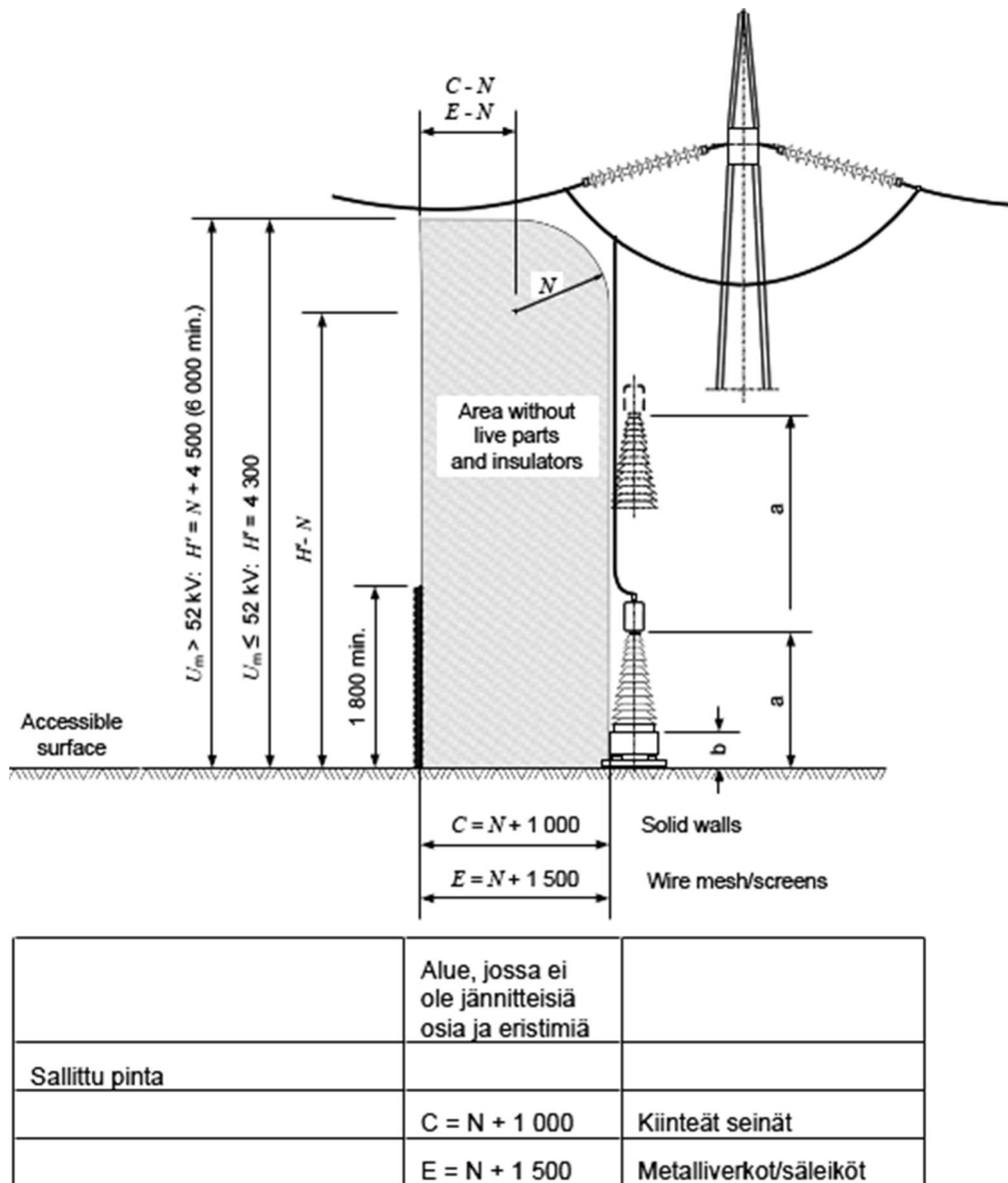
Mikäli käytetään suojuksia tai metalliverkkoja, jotka eivät ole kiinteitä, niin etäisyyksiä on kasvatettava. Tällä pyritään huomioimaan suojuksen tai verkon siirtymät. (SFS 6001, s. 46) Standardi ei kuitenkaan ota kantaa siihen, kuinka paljon etäisyyttä on kasvatettava.

3.4.1.2 Etäisyydet esteistä

Suomessa esteiden käyttö kosketussuojausmenetelmänä normaaleissa sähköasennuksissa on kielletty (SFS 6001, s. 46).

3.4.1.3 Etäisyydet aidasta

Tähän on koottu koteloidut ulkolaitteiston ympäröivän aidan vähimmäisetäisyydet jännitteisistä osista (ks. kuva 3.5).



Kuva 3.5. Etäisyys ympäröivästä aidasta tai seinästä ja niiden vähimmäiskorkeus. Mitat millimetreinä. (SFS 6001, s. 52)

Aidat, joissa ei ole aukkoja:

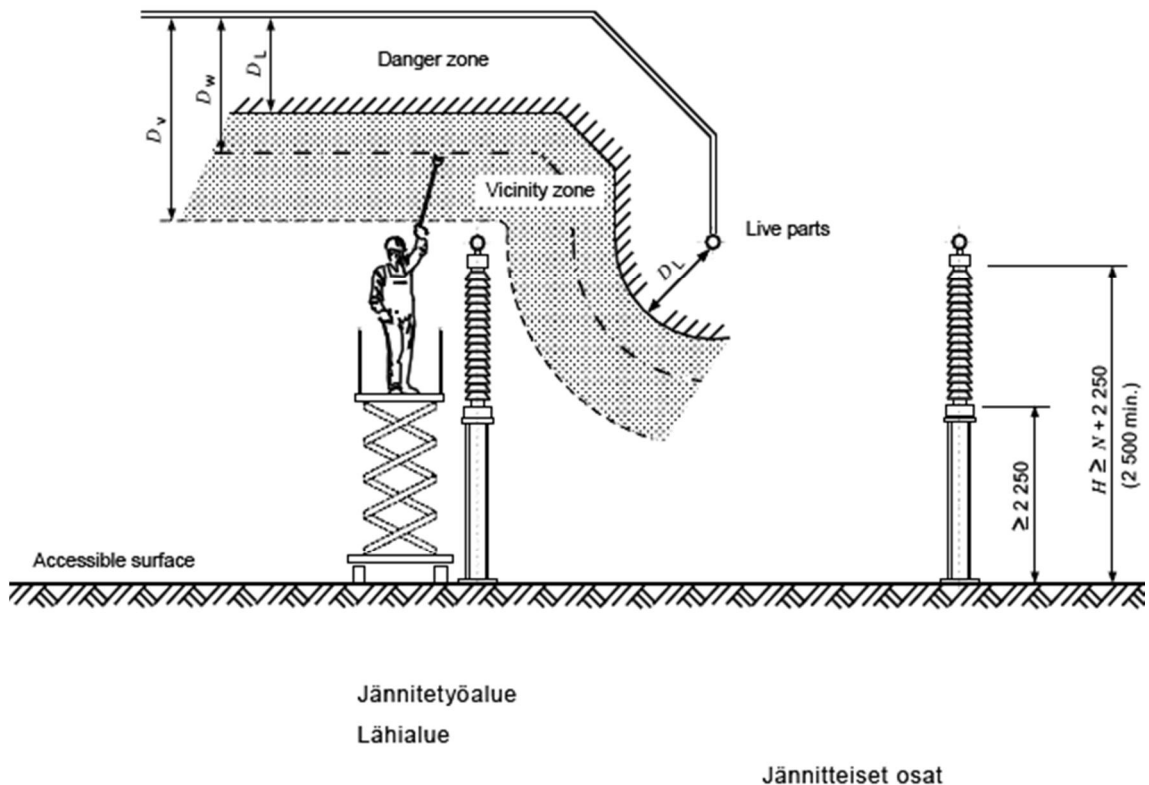
- $C = N + 1\,000$ mm.

Verkkoaidat:

- $E = N + 1\,500$ mm.

3.4.1.4 Jännitteisten osien vähimmäiskorkeus sähkötiloissa

Tähän on koottu jännitteisten osien vähimmäiskorkeus pinnoista tai tasanteista, joilla voi kulkea jalan (ks. kuva 3.6).



Sallittu pinta

Kuva 3.6. Vähimmäiskorkeudet ja vähimmäistyöskentelyetäisyydet sähkötiloissa. Mitat millimetreinä. (SFS 6001, s. 53)

Kosketussuojaamattomille jännitteisille osille (kun oletetaan johtimen suurin sallittu riippuma):

- $H = \max(N + 2600 \text{ mm}; 2800 \text{ mm})$.

Mikä tahansa eristyksen alin osa, jolla voi seisoa (ellei pääsyä estetä muilla tavoilla):

- 2600 mm.

3.4.1.5 Etäisyydet rakennuksiin

Tähän on koottu sähköasemarakennuksen katon yli kulkevien paljaiden johtimien vähimmäisetäisyydet, kun oletetaan johtimen maksimiriippuma (ks. kuva 3.7).

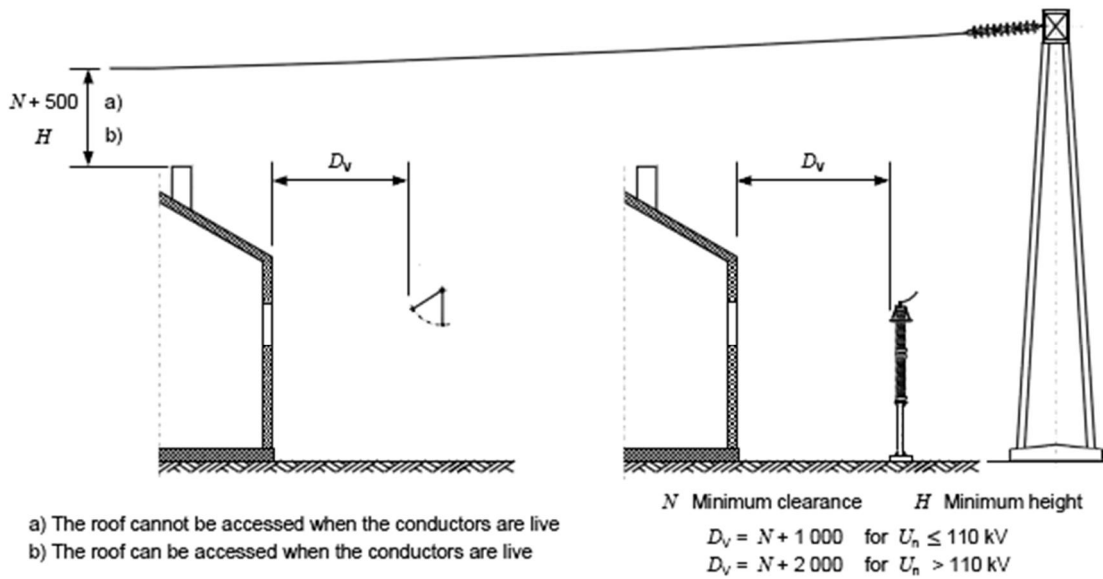


Figure 4a – Outer wall with unscreened windows

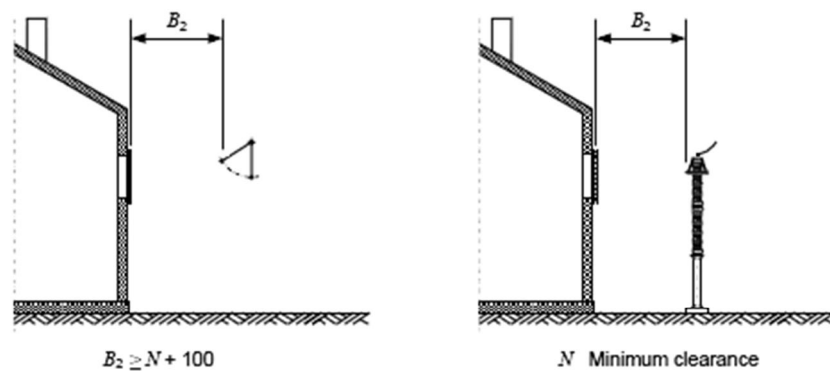
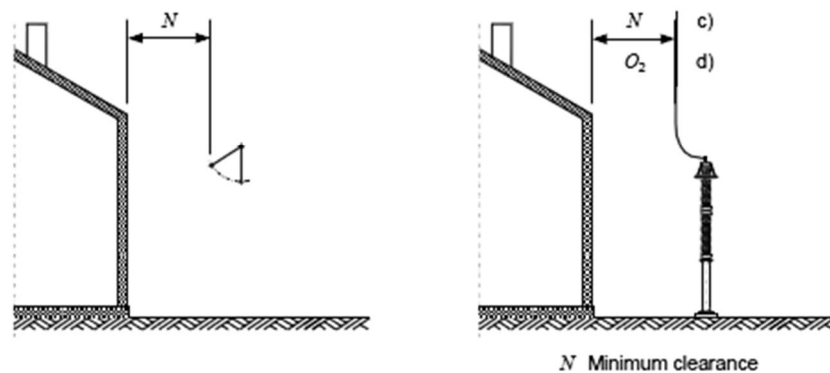


Figure 4b – Outer wall with screened windows



- c) N if the roof is non-accessible when the conductors are live
d) $O_2 \geq N + 300$ (600 min.) if the roof is accessible when the conductors are live

Figure 4c – Outer wall without windows

Kuva 3.7. Rakennusten läheisyydessä olevat johtimet. Mitat millimetreinä. (SFS 600, s. 54)

Jos katolle voi päästä johtimien ollessa jännitteisiä:

- kohdan 3.4.1.4 mukaan.

Jos katolle ei voi päästä johtimien ollessa jännitteisiä:

- $N + 500$ mm.

Katon reunasta vaakasuunnassa, jos katolle voi päästä johtimien ollessa jännitteisiä:

- $O_2 = \max(N + 300 \text{ mm}; 600 \text{ mm})$.

Lisäksi sähköasemarakennuksen lähellä olevien paljaiden johtimien vähimmäisetäisyys rakennuksista on oltava seuraavanlainen, kun johtimen maksimiriippuma ja heiluminen otetaan huomioon.

Jos ulkona on suojaamattomia ikkunoita:

- lähialueen etäisyys D_v on taulukon 3.1 mukainen (muilla kuin ilmajohdoilla).

Taulukko 3.1. Lähialueen ulkomitan D_v arvot eri jännitteillä muilla kuin ilmajohdoilla. (SFS 6002, s. 55)

Nimellisjännite U_N kV	≤ 1	3	6	10	20	30	45	110	220	400
Lähialueen ulkomitta D_v m	0,7	1,2	1,2	1,4	1,4	1,6	1,6	2,0	3,6	4,5

Käytettäessä ilmajohdtoa (eli lähes aina) D_v korvataan taulukon 3.2 mukaisella lähimitan arvolla.

Taulukko 3.2. Työalueen vähimmäisetäisyys metreinä. Suluissa oleva arvo tarkoittaa pienintä työskentelyetäisyyttä avojohdon jännitteisen osan alapuolella. (SFS 6002, s. 56)

Nimellisjännite kV	Vähimmäisetäisyys m	
	avojohdtoa tai muu paljas jännitteinen osa	riippukaapeli
≤ 1	2(2)	0,5
$> 1 \dots 45$	3(2)	1,5
110	5(3)	
220	5(4)	
400	5(5)	

Jos ulkoseinässä on kohdan 3.4.1.1 mukaisesti suojattuja ikkunoita:

- B_2 (ks. kohta 3.4.1.1).

Jos ulkoseinässä ei ole ikkunoita:

- N .

3.4.1.6 Ulkolaitteistoja ympäröivät aidat tai seinät ja kulkuovet

Asiaton pääsy ulkolaitteistoihin on estettävä. Aidan korkeuden ja rakenteen tulee olla riittävä, jotta sen yli ei voi kiivetä. Aita voi olla joko verkkoaita tai kiinteä aita (ks. etäisyydet kohdasta 3.4.1.3). Standardi (SFS 6001) asettaa aidalle seuraavat vaatimukset:

- aidan on oltava vähintään 2000 mm korkea
- alareuna ei saa olla kiinteän aidan kohdalla yli 50 mm maan pinnasta
- alareuna ei saa olla portin kohdalla yli 100 mm maan pinnasta.

3.4.1.7 Masto- ja pylväsasennukset

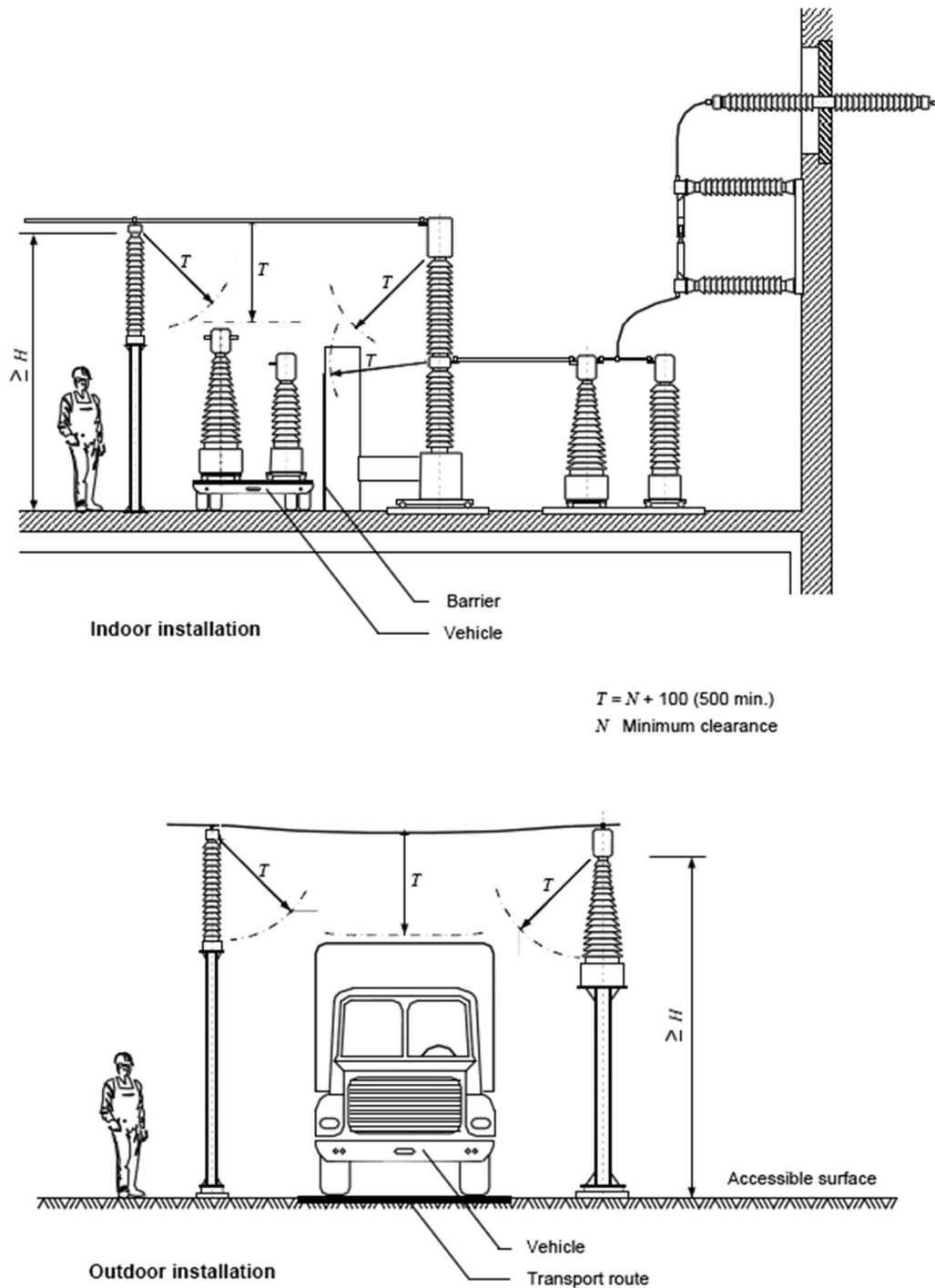
Paikoissa, jonne yleisöllä on esteetön pääsy, jännitteisten osien vähimmäiskorkeus on oltava (SFS 6001, s. 50):

- $H' = 5500 \text{ mm}$, kun $U_m \leq 24 \text{ kV}$
- $H' = \max(N + 5300 \text{ mm}; 6000 \text{ mm})$, kun $U_m < 24 \text{ kV}$.

Näitä etäisyyksiä on kuitenkin kasvatettava paikoissa, joissa lumikerros voi pienentää niitä. (SFS 6001, s. 50)

3.4.2 Kuljetusreitit

Kuljetusreittien kantavuuden, korkeuksien ja leveyksien on oltava riittävät ennakoitujen kuljetusyksiköiden siirtämiseen. Sähkötiloissa ajoneuvojen tai muiden laitteiden kulku jännitteisten osien alapuolella tai läheisyydessä on sallittua, jos tässä esitetyt standardin (SFS 6001) vähimmäisetäisyydet toteutuvat (ks. kuva 3.8).



Kuva 3.8. Vähimmäisetäisyydet kuljetuksissa. Mitat millimetreinä. (SFS 6001, s. 56)

Ajoneuvo kuormineen ja ovet avattuina ei ulotu jännitetyöalueelle:

- $T = \max(N + 100 \text{ mm}; 500 \text{ mm})$.

Luoksepäästävissä paikoissa on jännitteisten osien vähimmäiskorkeus aina oltava:

- H (kohdan 3.4.1.4 mukaan).

Kuljetettavien tavaroiden ja jännitteisten osien välisille vaakaetäisyyksille sovelletaan vastaavia periaatteita.

4 SÄHKÖASEMIA JA VOIMAJOHTOJA KOSKEVAT STANDARDIT

Tässä luvussa kerrotaan standardeista, jotka asettavat vaatimukset sähkönsiirtorakenteiden suunnittelulle. Sähkönsiirtoverkko koostuu kahdesta osasta: johdoista ja niitä yhdistävistä sähköasemista. Yhdessä ne kattavat koko sähkönsiirtoverkon. Voimajohtoihin sovelletaan standardia SFS-EN 50341-1 (2012) ja sen kansallista liitettä SFS-EN 50341-3-7 (2010). Sähköasemiin sovelletaan puolestaan standardia SFS 6001 (2014). Selkeyden vuoksi näitä voidaan nimittää myös ilmajohtostandardiksi (SFS-EN 50341) ja sähköasemastandardiksi (SFS 6001).

Molempia standardeja ollaan tämän työn tekohetkellä päivittämässä ja/tai uusimassa. Työssä on pyritty viittaamaan aina tämän hetkiseen painokseen, ellei kyseistä kohtaa olla päivittämässä. Mikäli jotkut standardin kohdat (kuten taulukot ja kuvat) ovat päivittymässä uuteen painokseen, niin päivitettyjä kohtia on pyritty käyttämään. Sähköasemien ja voimajohtojen suunnitteluun liittyvistä asioista on kerrottu kohdissa 5.3 (sähköasemat) ja 6.4 (voimajohdot).

Sähkönsiirtorakenteiden toteutus ja niihin liittyvät standardit kuuluvat kauppa- ja teollisuusministeriön piiriin, kun muuta rakentamista ohjaa ympäristöministeriö. Tämä on yksi keskeisimpiä syitä sille, miksi sähkönsiirtorakenteet poikkeavat muusta rakentamisesta. Ministeriöstä johtuva ero koskee sekä suunnittelua että rakentamista.

4.1 Sähköasemastandardit

Sähköaseman suunnitteluun sovelletaan standardia SFS 6001 (2014), joka käsittelee suurjännitesähköasennuksia. Nimellisjännitteeltään yli 1 kV vaihtojännitteisiä (tai yli 1,5 kV tasajännitteisiä) sähköasennuksia kutsutaan suurjännitesähköasennuksiksi. Niihin lukeutuvat muun muassa laitteet, kaapelit, johdot ja rakennukset. Standardissa suurjännitesähköasennuksiksi luetaan kaikki sähköasemat. Sen sijaan standardi ei koske esimerkiksi erillisten laitteiden välisiä ilmajohtoja.

Uudisrakentamisen lisäksi standardi koskee korjaus-, muutos- ja laajennustöitä. Sen vaatimukset eivät kuitenkaan ole taannehtivia, vaan rakentamisajankohdan määräyksiä on mahdollisuus vielä käyttää, jos ne täyttävät sen aikaiset määräykset.

Standardi määrittää perusvaatimukset, joihin sisältyy sähköiset ja mekaaniset vaatimukset sekä ilmasto- ja ympäristöolosuhteet. Vaatimuksilla pyritään varmistamaan laitteiden ja tukirakenteiden kestävyys. Näistä mekaaniset vaatimukset ja tukirakenteiden kestävyys kuuluvat rakennesuunnittelun piiriin.

Standardi määrittelee kuormitustapaukset, jotka rakenteiden suunnittelussa on otettava huomioon. Kuormitukset jaetaan kuuluvaksi *normaaliin* tai *poikkeukselliseen* kuormitustapaukseen. (SFS 6001, s. 23-24)

Normaalissa kuormitustapauksessa on otettava huomioon:

- oman painon aiheuttama kuormitus
- vetokuormitus
- asennuskuormitus
- jääkuorma
- tuulikuorma.

Poikkeuksellisessa kuormitustapauksessa on otettava huomioon oman painon aiheuttama kuorma ja vetokuorma, jotka vaikuttavat samanaikaisesti yhdessä suurimman tilapäisen kuorman kanssa, joita ovat:

- kytkentävoimat
- oikosulkuvoimat
- johtimien katkeamiset.

Molemmissa tapauksissa on tutkittava useita kuormitusyhdistelmiä, joista epäedullisinta käytetään rakenteiden mekaanisen lujuuden määrittämiseen (SFS 6001, s. 30). Standardi ei kuitenkaan ota kantaa osavarmuuslukuihin, yhdistelykertoimiin tai rakenteiden mitoittamiseen. Tämän vuoksi on syytä tarkastella rakenteiden suunnittelua ohjaavia yleisiä ohjeita ja sääntöjä.

Suomessa rakenteiden ja rakennusosien suunnittelua ohjaavat Eurokoodit, joissa esitellään yhteiset rakennesuunnittelusäännöt jokapäiväiseen käyttöön. Niiden yhtenä tärkeimpänä tarkoituksena on, että pystytään osoittamaan rakennusten sekä maa- ja vesirakennuskohteiden mekaaninen lujuus ja vakavuus. (SFS-EN 1990, s. 10)

Eurokoodin osa SFS-EN 1990 (2002) määrittelee rakenteiden suunnitteluperusteet. Standardi perustuu rajatilamenetelmän ja osavarmuuslukumenettelyn käyttöön. Uusia rakenteita suunniteltaessa sitä on tarkoitettu sovellettavaksi yhdessä muiden Eurokoodistandardien SFS-EN 1991-1999 kanssa. Standardia (SFS-EN 1990) voidaan käyttää myös sellaisten rakenteiden suunnitteluun, jotka jäävät standardien SFS-EN 1991-1999 soveltamisalueen ulkopuolelle. Tämä koskee erityisesti rakenteita, joissa esiintyy kuormia ja materiaaleja, joita kyseisissä standardeissa ei käsitellä. (SFS-EN 1990, s. 10-12, 16) Tämän pohjalta voitaneen todeta, että Eurokoodin soveltaminen sähköaseman rakenteisiin, siltä osin kuin se on mahdollista, on sallittua.

Sähköasemat poikkeavat tavanomaisista rakennuksista. Niillä esiintyy poikkeuksellisia kuormia, ne ovat pääsääntöisesti miehittämättömiä ja niiden käyttötarkoitus liittyy ainoastaan sähköverkon toimintaan. Koska standardia SFS-EN 1990 voidaan soveltaa, niin myös siinä määriteltyjen osavarmuuslukujen ja kuormien yhdistelykertoimien käyttö on sallittua. Kuormiin voidaan soveltaa Eurokoodia SFS-EN 1991 siltä osin kuin on mahdollista. Kuormia, joita kyseisissä standardeissa ei käsitellä, määritetään muita menetelmiä käyttäen. Näitä ovat erityisesti oikosulkuvoimat.

Luotettavuuden hallinta rakennuskohteissa kuuluu myös standardin SFS-EN 1990 piiriin. Käytännössä kaikki rakennukset määritellään seuraamusluokaltaan yhteen kol-

mesta vaihtoehdosta CC1, CC2 tai CC3. Tällä otetaan huomioon rakenteen vaurion tai vian seuraamuksia. Suomessa rakennuskohteiden seuraamusluokka on määritelty kansallisessa liitteessä (ks. taulukko 4.1).

Taulukko 4.1 Rakennuskohteiden seuraamusluokan (CC) määrittely. (SFS NA EN 1990, s. 6-7)

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten <ul style="list-style-type: none"> – yli 8-kerroksiset²⁾ asuin-, konttori- ja lii-kerakennukset – konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot – raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä
		sisältävät rakennukset Erikoisrakenteet kuten esim. suuret mastot ja tornit Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet hienorakeisten maalajien alueilla siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä.
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä kuten esim. varastot Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa kuten <ul style="list-style-type: none"> – matalalla olevat alapohjat, ilman kellaritiloja – ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne – sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana – standardin SFS-EN 1993-1-3:n rakenneluokkien (structural class) II ja III muotolevyrakenteet. – standardin SFS-EN 1993-1-3:n rakenneluokan (structural class) I muotolevyrakenteet levyyn taivutusta aiheuttaville pintaa vasten kohtisuorille kuormille³⁾.

Taulukossa määritetään, että seuraamusluokalla CC3 on suurimmat vaikutukset, ja seuraamusluokalla CC1 pienimmät vaikutukset. Seuraamusluokkiin liittyy kolme luotet-

tavuusluokkaa RC1, RC2 tai RC3, joiden mukaan määräytyy kuormakerroin K_{FI} (ks. taulukko 4.2).

Taulukko 4.2 Kuormakerroin K_{FI} . (SFS-EN 1990, s. 94)

Kuormakerroin K_{FI}	Luotettavuusluokka		
	RC1	RC2	RC3
K_{FI}	0,9	1,0	1,1

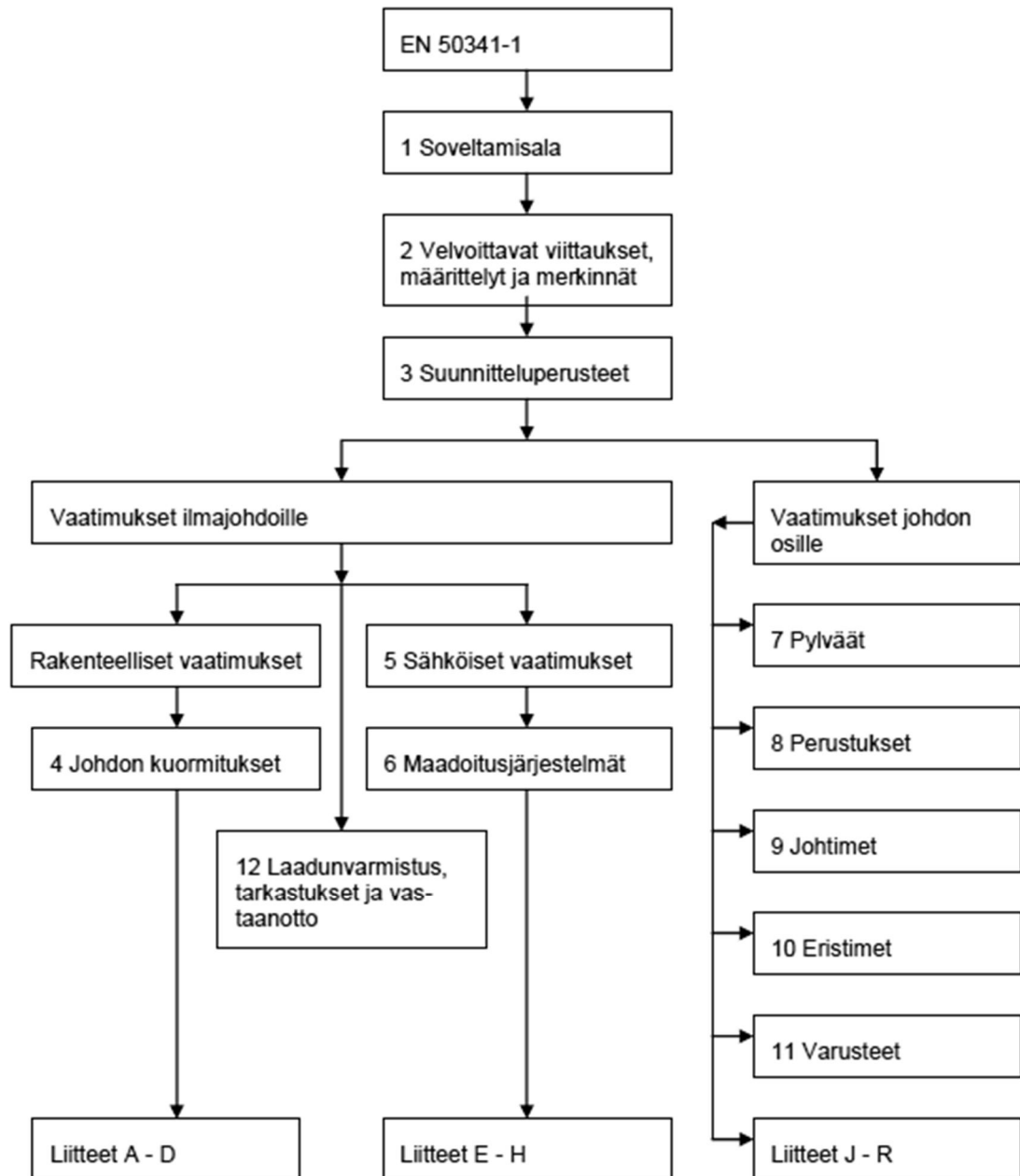
Tämä tarkoittaa sitä, että seuraamusluokkaan CC3 kuuluvan rakennuskohteen luotettavuusluokka on RC3, jolloin kohteessa käytettävä kuormakerroin K_{FI} on 1,1. Vastaavasti seuraamusluokkaan CC2 kuuluvan rakennuskohteen luotettavuusluokka on RC2 ja kuormakerroin K_{FI} on 1,0 sekä seuraamusluokkaan CC1 kuuluvan rakennuskohteen luotettavuusluokka on RC1 ja kuormakerroin K_{FI} on 0,9.

Sähköaseman tapauksessa seuraamusluokka voi olla hankala määrittää, sillä niiden vaikutukset ovat epäsuoria, toisin kuin monien rakennusten. Sähköasemat ovat pääosin tyhjiä, joten ihmishenkien menetyksen kannalta mahdollinen rakenteen sortuman aiheuttama seuraamus on pieni. Toisaalta seuraamukset saattaisivat olla suuret, mikäli tärkeitä kohteita, kuten sairaaloita tai lennonohjaukselta, katkeaisi sähköt. Lisäksi taloudellisia, sosiaalisia tai ympäristövaikutuksia on hankala määrittää. Seuraamusluokka suositellaankin määritettäväksi aina projektikohtaisesti.

Sähköaseman rakenteet ovat pääosin terästä ja betonia, jolloin niihin voidaan soveltaa teräsrakenteiden Eurokoodia SFS-EN 1993 ja betonirakenteiden Eurokoodia SFS-EN 1992. Maa- ja pohjarakenteiden osalta voidaan soveltaa Eurokoodia SFS-EN 1997.

4.2 Ilmajohdostandardit

Voimajohtojen suunnitteluun sovelletaan standardia SFS-EN 50341-1 (2012) sekä sen kansallista liitettä SFS-EN 50341-3-7 (2010). Standardi kattaa kaikki sähkönsiirrossa käytettävät ilmajohdot. Myös johdon osat, kuten pylvää ja perustukset, suunnitellaan standardin mukaisesti (ks. kuva 4.1).



Kuva 4.1 Standardin EN 50341-1 rakenne. (SFS-EN 50341-1, s. 19)

Standardia sovelletaan uusiin ilmajohtoihin, joiden nimellisjännitteet ovat yli 1 kV ja nimellistaajuudet alle 100 Hz (esimerkiksi Suomessa ja Euroopassa sähkönsiirtoverkoissa käytetty taajuus on 50 Hz). Johtoja, jotka täyttävät niiden rakentamisajankohtana voimassa olleet mekaaniset vaatimukset voidaan edelleen käyttää. Johtojen korjaus-, perusparannus- ja muutostöitä voidaan kuitenkin tehdä rakentamisajankohtana voimassa olleita vaatimuksia noudattaen. Standardia voidaan soveltaa myös ilmajohtoihin, jotka on toteutettu kaapeleilla ja päällystetyillä johtimilla. Standardia ei kuitenkaan sovelleta suljettujen sähköalueiden sisällä oleviin johtoihin. Poikkeuksen muodostaa sähköase- man sisään jäävä päätepylväs eli portaali. (SFS-EN 50341-1, s. 18)

Standardi määrittää kaikki ilmajohtoihin kohdistuvat kuormitukset, joita ovat:

- pysyvät kuormat

- tuulikuormat
 - johtimien tuulikuormat
 - eristimien tuulikuormat
 - ristikkopylväiden tuulikuormat
 - putkimaisten pylväiden tuulikuormat
- jääkuormat
- yhdistetty tuuli- ja jääkuorma
- lämpötilavaikutukset
- varmuuskertoimet
- turvallisuuskuormat
 - rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset kuormat
 - asentajien painosta johtuvat kuormat
- oikosulkuvirtojen aiheuttamat voimat
- muut erikoiskuormat
 - lumivyöryt
 - maanjäristykset.

Standardissa määritetään vaatimukset ilmajohdoille ja kaikille sen osille. Lisäksi siinä esitetään niin sanotut standardikuormitustapaukset, jotka kuvaavat tuuli- ja jääkuormia, niiden yhdistelmiä, lämpötilavaikutuksia, rakentamisen ja kunnossapidon aikaisia kuormia sekä varmuuskuormia (ks. taulukko 4.3).

Taulukko 4.3 Standardikuormitustapaukset. (SFS-EN 50341-1, s. 68)

tapaus		
1a	4.4	Tuulikuormat
2a 2b 2c 2d	4.5	Yhdenmukaiset jääkuormat kaikissa jänteissä Yhdenmukaiset jääkuormat, poikittainen taivutus Toispuoliset jääkuormat, pitkittäinen taivutus Toispuoliset jääkuormat, vääntötaivutus
3	4.6	Yhdistetyt tuuli- ja jääkuormat
4	4.7	Minimilämpötila tuulella/ilman tuulta
5a 5b	4.8.2 4.8.3	Varmuuskuormat, vääntökuormat Varmuuskuormat, johdon suuntaiset kuormat
6a 6b	4.9.1 4.9.2	Turvallisuuteen liittyvät kuormat: Rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset kuormat Asentajien aiheuttamat kuormat

Standardi määrittää myös osavarmuusluvut näille kuormitustapauksille (ks. taulukko 4.4). Mitoittavan kuorman määrittäminen kyseisen standardin mukaan koskee ilmajohdojen lisäksi sen osia, kuten pylväitä ja perustuksia.

Taulukko 4.4 Osavarmuusluvut γ ja yhdistelmäkertoimet ψ murtorajatilakuormille. (SFS-EN 50341-1, s. 70)

Kuormitus	Symboli	Luotettavuustaso		
		1	2	3
Muuttuvat kuormat (Ilmastolliset kuormat):				
Huipputuulikuorma	γ_W	1,0	1,2	1,4
Nimellinen tuulikuorma	Ψ_W	0,4	0,4	0,4
Huippujääkuorma	γ_I	1,0	1,25	1,5
Nimellinen jääkuorma	Ψ_I	0,35	0,35	0,35
Pysyvät kuormat:				
Omapaino	γ_G	1,0		
Varmuuskuormat (Satunnaiset kuormat):				
Vääntöä aiheuttavat kuormat (johdinvoimista)	γ_{A1}	1,0		
Johdon suuntaiset kuormat (johdinvoimista)	γ_{A2}	1,0		
Turvallisuuteen liittyvät kuormat:				
Rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset kuormat ^a	γ_P	1,5		
Yllä mainittuja kuormitusten osavarmuuslukuja on käsiteltävä yhdessä muissa tämän standardin kohdissa määriteltujen materiaaliominaisuuksien osavarmuuslukujen kanssa				
^a Tuuli- ja jääkuormien yhdistelmäarvoina voidaan käyttää todellisia voimia, jotka todennäköisesti esiintyvät rakentamisen ja kunnossapidon aikana. Usein tuuli- ja jääkuormien vaikutukset voidaan jättää huomiotta.				

Taulukossa esiintyvä luotettavuustaso riippuu käytettävästä jännitteestä ja johtojen tärkeydestä. Suomen kansallinen liite SFS-EN 50341-3-7 määrittää, että tasoa 1 käytetään ≤ 45 kV johdoille ja tasoa 2 yli 45 kV johdoille, ellei projektieritelmässä ole toisin määriteltä.

4.3 Standardien vertailua

Ilmajohtostandardi eroaa sähköasemastandardista merkittävästi kuormien määrittämisessä ja laajuudessa. Myös rakenteiden mitoittamiseen otetaan kantaa. Ilmajohtojen ja sen osien luotettavuus saavutetaan ilmajohtostandardin lisäksi Eurokoodien 1, 2, 3, 5, 7 ja 8 mukaisella suunnittelulla. Sähköasemastandardissa ei puolestaan viitata sanallakaan Eurokoodiin; siinä mekaaniset vaatimukset ovat lyhyesti listattu ja kustakin kuormituksesta on mainittu muutamalla lauseella ja mahdollisesti viitattu muihin (IEC) standardeihin.

Yleensä oikosulkuvoimia tai muita erikoiskuormia ei oteta huomioon voimajohtojen mitoituksessa, vaan tavanomaiset kuormitustapaukset (tuuli- ja jääkuormat) riittävät. Tässä mielessä voimajohdot eroavat sähköaseman rakenteista, joissa oikosulkuvoimat ovat keskeisemmässä osassa. Ero johtuu siitä, että voimajohdot pylväineen ovat huomattavasti korkeampia rakennelmia kuin sähköasemarakenteet, jolloin ne altistuvat tuulikuormalle aivan eri tavalla. Johtimien tuulikuormiin standardi SFS-EN 1991-1-4 ei anna kovin selkeitä ohjeita, minkä vuoksi ilmajohtostandardissa on esitetty varsin yksityiskohtaisesti tuulikuorman määrittäminen nimenomaan johdoille ja sen osille.

Lisäksi voimajohtojen jännevälit ovat usein satoja metrejä, mikä aiheuttaa pylväille suuria johdinkuormituksia. Sähköasemarakenteilla jännevälit ovat puolestaan selvästi pienempiä, usein noin 10 metriä. Siten on järkeenkäypää, että ilmajohtostandardeja ei sellaisenaan sovelleta sähköasemien ilmajohtoihin.

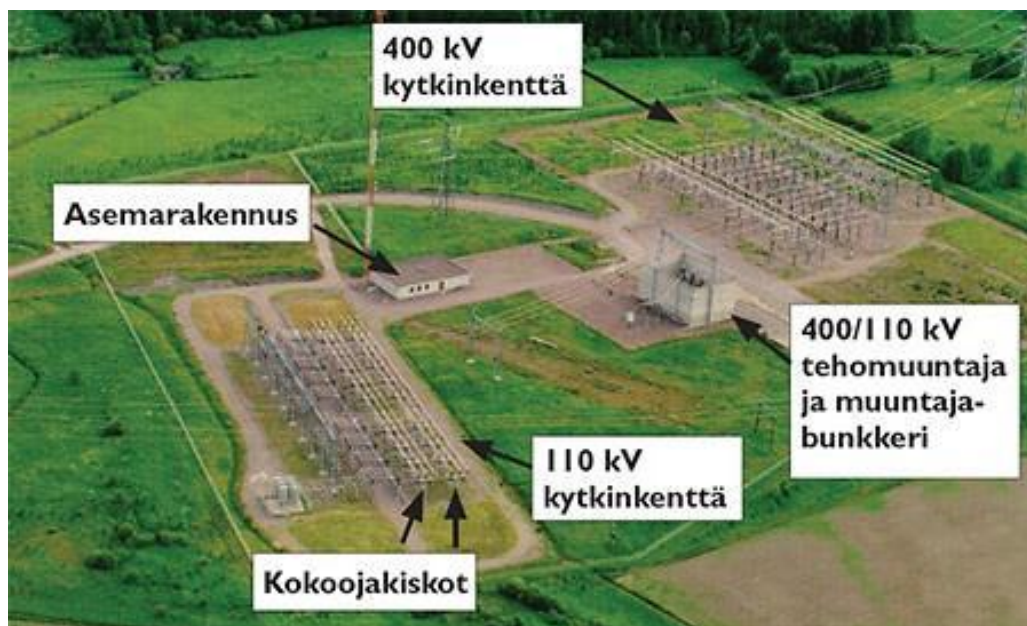
5 SÄHKÖASEMAT

Tämä luku kertoo erityyppisistä sähköasemista, niiden rakenteista, laitteista ja suunnitteluun liittyvistä asioista. Varsinkin ulkokytkinlaitosten rakenteita suunniteltaessa on tärkeä ymmärtää eri laitteiden toimintaoperaatiot. Tarkoituksena on antaa hyvät lähtökohdat sähköaseman suunnitteluun.

5.1 Yleistä

Sähköasema on verkon tärkein solmukohta, jossa sähköenergiaa voidaan muuntaa, jakaa ja keskittää. Näitä operaatioita varten sähköasemilla on kiskoja, erilaisia laitteita ja niiden välisiä kytkentöjä. Sähköasemaa voidaan sen käyttötarkoituksen mukaan nimittää kytkinlaitokseksi, kytkinasemaksi, syöttöasemaksi tai muuntoasemaksi. Nämä termit eivät kuitenkaan ole virallisia määritelmiä ja eri lähteissä termejä saatetaan käyttää sekaisin. Esimerkiksi Fingrid määrittelee kytkinlaitokset ja muuntoasemat seuraavasti: kytkinlaitos yhdistää vain saman jännitetason johtoja ja muuntoasema kahden eri jännitetason johtoja (Heikkilä 2004).

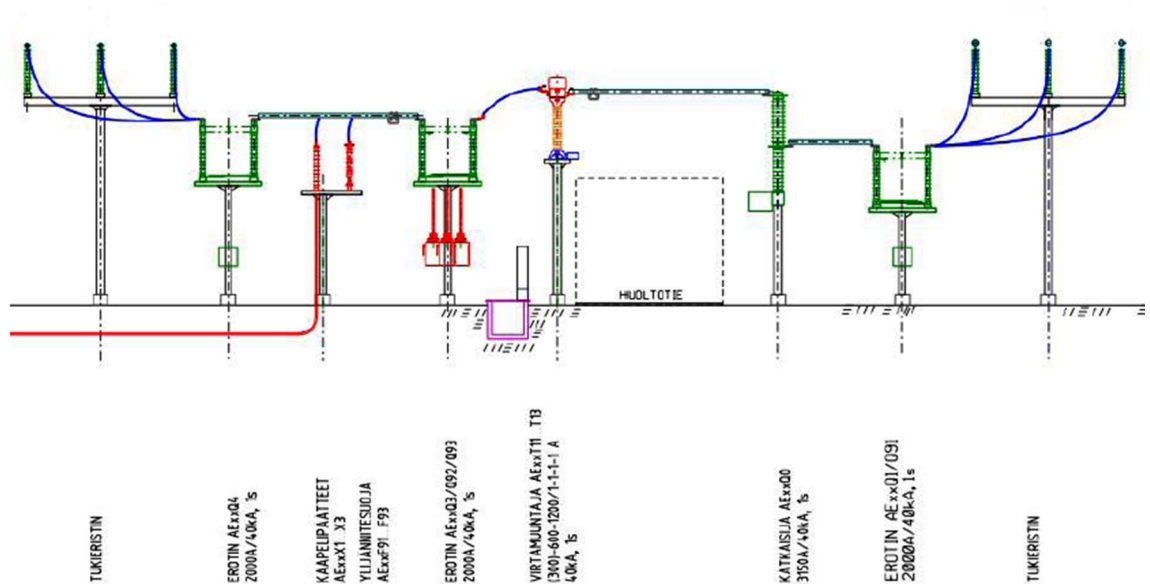
Tässä työssä sähköasemalla tarkoitetaan suljettua aluetta, jossa sen koosta riippuen voi olla yksi tai useampi kytkinkenttä (ks. kuva 5.1). Lisäksi sähköasemaa voidaan nimittää joko ulko- tai sisäkytkinlaitokseksi riippuen siitä, asennetaanko laitteet ulos vai sisätiloihin. Tässä työssä keskitytään ulkokytkinlaitoksiin.



Kuva 5.1. 400/110 kV sähköasema. (Heikkilä 2004)

Kuvan sähköasemalla on asemarakennus, kaksi kytkinkenttää molemmille jännitteille sekä niitä yhdistävä tehomuuntaja. Muuntajabunkkerin päällä oleva ristikkomainen teräsrakenne on niin sanottu muuntajaportaali. Myös molempien kytkinkenttien yhteydessä on vastaavat rakenteet, joita kutsutaan pääteportaaleiksi. Näiden portaalien tehtävänä on kannatella ilmajohtoja. Portaaleista ilmajohdot ohjataan alas ja kytketään muuntajiin tai kytkinkentän kokoojakiskoihin/laitteisiin, jotka suorittavat varsinaiset toimenpiteet.

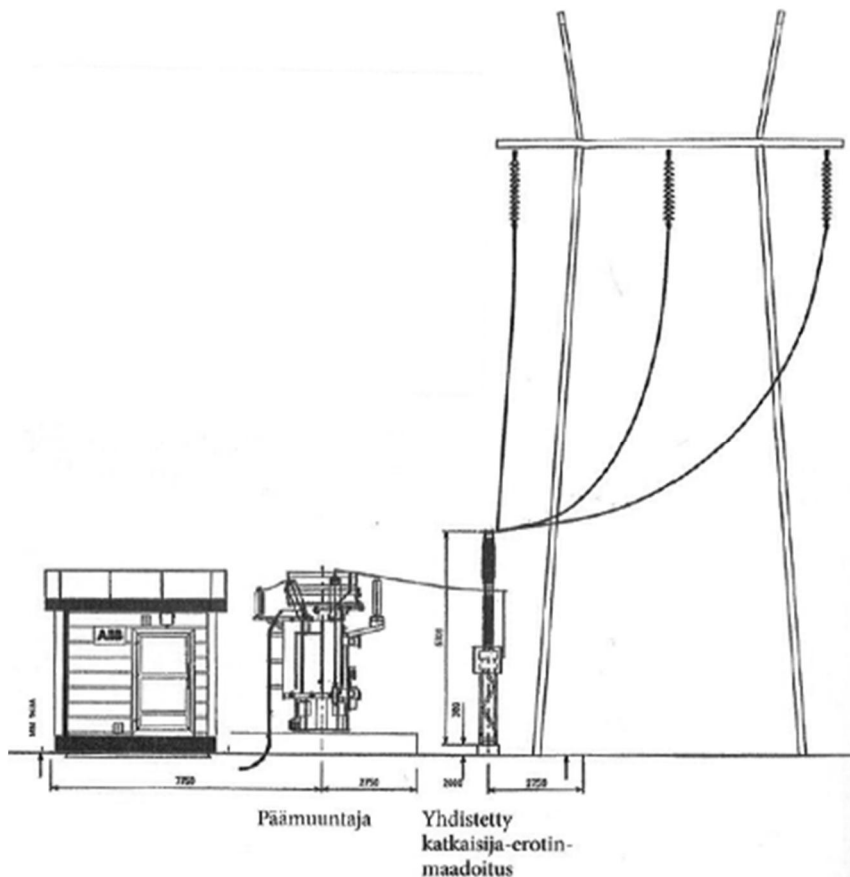
Sähköaseman rakenteeseen vaikuttavia keskeisimpiä asioita ovat laitoksen läpi siirrettävä teho ja kuinka tärkeässä verkon kohdassa se sijaitsee. Suurjänniteverkkoon kuuluvat sähköasemat sisältävät yleensä asemarakennuksen ja 1-3 kytkinkenttää. Asemarakennus on sähköaseman ohjauskeskus, jossa tehdään verkon säädöt ja asetukset. Kytkinkentät muodostuvat kokoojakiskoista, laitteista, johdoista ja näitä yhdistävistä kytkennöistä. Kuvassa 5.2 on esitetty erään sähköaseman kytkinkentän leikkaus.



Kuva 5.2 Leikkaus 110 kV ulkokytkinlaitoksen kytkinkentästä (Fingrid Oyj).

Kuvan kytkinkenttä koostuu järjestyksessä vasemmalta oikealle: kokoojakisko, erotin, kaapelipäätelaite, erotin, virtamuuntaja, katkaisija, erotin ja kokoojakisko. Kyseessä on melko tyypillinen kytkinkentän leikkaus, jossa vasemmalla ja oikealla laidoilla on kiskot ja niiden välissä varsinaiset laitteet.

Kantaverkon sähköasemista suurimmalla osalla ei ole varsinaista tehomuuntajaa, vaan ne toimivat ainoastaan sähkönsiirron jakelupisteinä. Tämän kaltaisilta asemilta voi lähteä useita johtolähtiä esimerkiksi kaupunkeihin. Lähempänä kuluttajia johdot yhdistyvät, käyttötarkoituksesta riippuen, keskijänniteverkkoa syöttäviin sähköasemiin, jotka ovat usein varsin pelkistettyjä, minkä vuoksi ne ovat myös huomattavasti pienempiä ja rakenteeltaan yksinkertaisempia (ks. kuva 5.3).



Kuva 5.3 Kevytrakenteinen 110/20 kV sähköasema. (Lakervi & Partanen 2008, s. 124)

Sähköasemat voidaan jakaa niiden eristysmateriaalista riippuen joko ilmaeristettyihin sähköasemiin eli AIS-laitoksiin (*air insulated switchgear*) tai SF₆-kaasueristettyihin sähköasemiin eli GIS-laitoksiin (*gas insulated switchgear*). Suomen sähköasemat ovat pääasiassa ilmaeristeisiä kytkinlaitoksia, mutta myös GIS-laitoksia on rakennettu paljon. SF₆-eristettyjä kytkinlaitoksia voidaan nykyisin käyttää 12-800 kV jännitealueella (Elovaara & Haarla 2011b, s. 128). Suomessa niiden käyttö suurimmilla jännitteillä on kuitenkin ollut vähäistä.

Energiankulutuksen kasvaessa ja kaupunkien laajetessa on haettava uusia ratkaisuja sähköasemien tilantarpeen vähentämiseksi. Tilanpuute on erityisesti tiheään asuttujen alueiden, kuten pääkaupunkiseudun, ongelma. Tämän johdosta GIS-laitokset ovat viime vuosina kasvattaneet suosiotaan (Elovaara & Haarla 2011b, s. 128). Tulevaisuudessa ollaan enenemissä määrin rakentamassa niin sanottuja kompakteja kenttiä, joissa eri laitteet asennetaan samoille kannatustelineille. Lisäksi on olemassa erilaisia hybridi-kenttiä, joissa on sekä ilma- että SF₆-eristeisiä laitteita.

Ulkoasennuksissa pääasiallinen tilansäästö saadaan ratkaisuihin, joissa erillisistä erottimista voidaan luopua. Tällöin saadaan huolto- ja korjaustöihin vaadittavat turvavälit eliminoitua ja laitos muuttuu täysin huoltoa tarvitsemattomaksi. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 111)

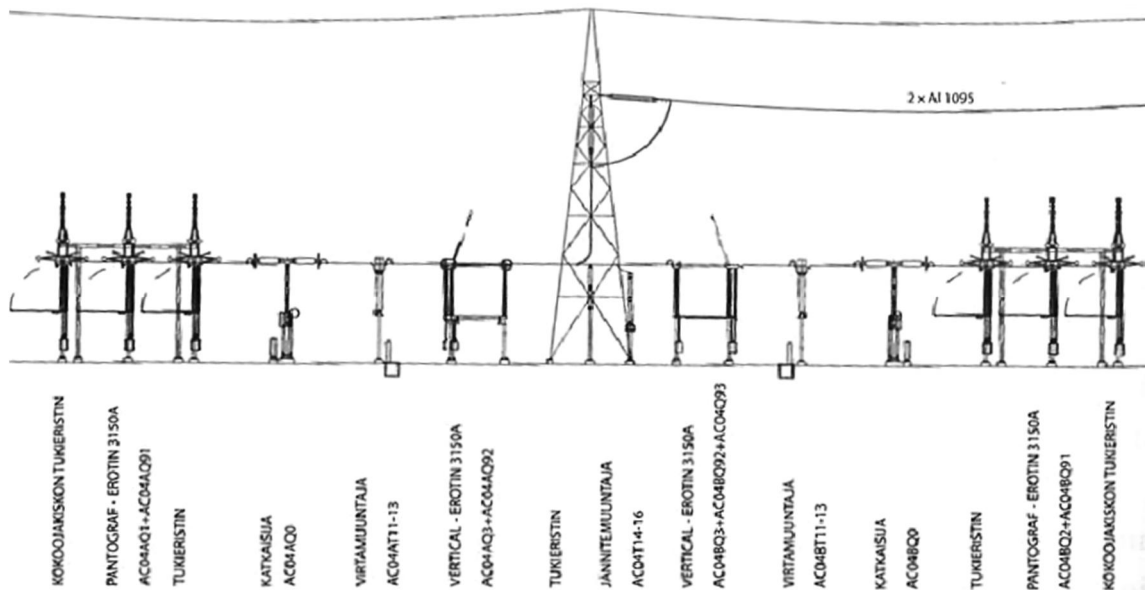
Sähköasemilla käytettävät kojeistot määräytyvät sen mukaan toteutetaanko ne sisä- vai ulkokytkinlaitoksena. Varsinkin suurjännitteisen GIS-laitoksen kojeisto eroaa huomattavasti tavanomaisempien ulkokytkinlaitosten kojeistoista. Kojestot ovat rakenne-

kokonaisuuksia, jotka käsittävät kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Ne jakautuvat sähköverkossa vaikuttavan jännitteen mukaan suur-, keski- ja pienjännitekojeistoihin. Tässä työssä kiinnostaa lähinnä suurjännitekojeistot, jotka voidaan jakaa joko ulko- tai sisäkojeistoihin. Toinen määritelmä on jakaa ne avorakenteisiin ja koteloituihin kojeistoihin. Avorakenteiset ulkokojeistot rakennetaan ulos ja niiden kokoojakiskojen sähköisenä eristeenä on ilma. Kojetojen ulkokuori voi olla joko metallia tai eristysainetta. Näistä metallikuoriset kojeistot ovat enemmän käytettyjä. Kojetojen eristeenä käytetään pääasiassa ilmaa tai eristyskaasua. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 117-122) Käytössä on myös muunlaisia kojeistoja ja määritelmiä, mutta niitä ei käsitellä tässä työssä. Tärkeintä on tiedostaa, että sähköaseman kojeistot ovat erilaisia sisä- ja ulkokytkeinlaitoksissa.

Kokoojakiskot mahdollistavat sähköasemilla erilaisten laitteiden vaatimat kytkentäratkaisut. Kokoojakiskoa voidaan nimittää pääkiskoksi, kun siihen liittyy katkaisija, ja apukiskoksi, kun siihen liittyy pelkkä erotin. Kiskojärjestelmän valinta riippuu muun muassa liitettävistä johdoista, muuntajista, aseman laajennettavuudesta, huollettavuudesta, yksinkertaisuudesta ja kustannuksista. Seuraavaksi on lueteltu muutama kokoojakiskojärjestelmän perustyyppi (Elovaara & Haarla 2011b, s. 102):

- kiskoton järjestelmä
- yksikiskojärjestelmä (K-järjestelmä)
- kisko-apukiskojärjestelmä (KA-järjestelmä)
- kaksoiskiskojärjestelmä (KK-järjestelmä).

Kiskotonta pääjärjestelmää käytetään esimerkiksi yksinkertaisilla pääteasemilla, joissa on vain yksi muuntaja. Tässä järjestelmässä käyttöä ei kuitenkaan voi jakaa eikä ohikytkeä. Yksikiskojärjestelmä on perusominaisuuksiltaan hyvin samanlainen kuin kiskoton järjestelmä, mutta kiskoon voidaan liittää useampia johtoja, mikä mahdollistaa verkoston jakamisen. Tämä on edullinen ja yksinkertainen ratkaisu tietyissä pienemmissä järjestelmissä. Huolto- ja korjaustyöt aiheuttavat yksikiskojärjestelmälle kuitenkin rajoitteita. Kisko-apukiskojärjestelmässä huolto- ja korjaustyöt saadaan suoritettua helpommin ja järjestelmä on muutenkin varmempi, mutta käyttö ei ole jaettavissa kahdelle kiskolle. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 102) Kaksoiskiskojärjestelmä on astetta monipuolisempi järjestelmä ja se mahdollistaa myös käytön jakamisen. Tärkeillä verkon sähköasemilla on aina huolto- ja korjausmahdollisuus. Tämän näkee esimerkiksi kuvasta 5.4, jossa on kaksi samanlaista kenttää vierekkäin. Niitä ei pidetä samanaikaisesti toiminnassa, vaan toinen kentistä toimii reservinä. Vioittunut tai huoltoa vaativa kenttä voidaan sulkea ja toimenpiteen ajaksi kytkeä reservinä oleva kenttä päälle. Joissain erityisen tärkeissä kohteissa kenttiä voi olla jopa kolme.



Kuva 5.4 Leikkaus 400 kV ulkokytinlaitoksen kytkinkentästä (Fingrid Oyj). (Elovaara & Haarla 2011b, s. 118)

Muitakin kiskojärjestelmiä löytyy, mutta tässä työssä niitä ei käsitellä sen tarkemmin. Todettakoon kuitenkin, että yksinkertaisemmasta järjestelmästä monimutkaisempaan mentäessä järjestelmän käyttövarmuus, jaettavuus ja monipuolisuus kasvavat. Tämä samalla nostaa järjestelmän kustannuksia, minkä vuoksi kokoojakiskojärjestelmän valinta on optimointia taloudellisuuden ja käytettävyyden välillä.

Ulkokytinlaitosten kokoojakiskot toteutettiin ennen köysikiskostoina, mutta nykyään niistä on luovuttu ja käytetään vain putkikiskostoja. Kiskojen materiaaleina on käytetty kuparia, alumiinia, seosalumiinia ja teräsalumiinia. Kuparia ei kuitenkaan juuri käytetä sen kalliin hinnan vuoksi. Puhdas alumiini taas kestää huonosti mekaanisia rasituksia. Putkikiskot valmistetaan pääosin alumiiniseoksista, joiden ominaisuudet, kuten kimmomoduuli, myötölujuus ja pituuden lämpötilakerroin, ovat määritelty standardissa SFS-EN 755-2. Putkikiskoston etuja köysikiskostoon verrattuna ovat suurten oikosulkuvirtojen helpompi hallinta, kytinlaitoksen pienempi ala ja korkeus, muunneltavuus ja linjakas ulkonäkö. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 115-116) Putkikiskostot ovat myös kevyempiä ja omaavat suuremman jäykkyyden samaa pituusyksikköä kohden, mikä mahdollistaa suurempien jänneväliden käytön ja siten vähemmän tarvittavia tukirakenteita. Lisäksi ne johtavat paremmin sähköä, ovat korroosiosuojattuja ja käyttöiältään pidempiä. (McWade 2008)

Verkon toiminnan kannalta suojautuminen vioilta on ensisijaisen tärkeää. Sähköasema on tässäkin suhteessa erityisen tärkeä kohde, sillä se sisältää huomattavan määrän kalliita laitteita, joiden toimintakyky täytyy kyetä ylläpitämään. Tästä sähköasemilla huolehtii mittamuuntajien, suojareleiden ja katkaisijoiden muodostama kokonaisuus. Tyypillisiä vikoja ovat salamaniskut, oiko- ja maasulut, johdinkatkokset, ylikuormitus ja kaksoismaasulut. Viat aiheutuvat yleensä sähköisistä ilmiöistä, mutta myös jään, lumen tai pylvään murtumisen aiheuttamat vikat ovat mahdollisia. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 335, 342-343)

5.2 Sähköasemien laitteet

Sähköasema sisältää suuren määrän laitteita, joilla kullakin on tärkeä tehtävä verkon toiminnan kannalta. Laitteet voidaan jakaa muuntajiin, kompensointi- ja kytkinlaitteisiin, joita ovat muun muassa katkaisijat ja erottimet. Nykyään käytetään myös paljon niin sanottuja erottavia katkaisijoita, jotka toimivat sekä erottimina että katkaisijoina. Seuraavaksi esitellään sähköasemien tärkeimmät laitteet, niiden toiminnot ja tehtävät. Laitteille on myös annettu niiden englanninkieliset termit, koska laitekohtaiset ohjeet ja taulukot ovat useimmiten englanninkielisiä.

5.2.1 Muuntajat

Muuntajat voivat erota toisistaan rakenteeltaan, kytkennöiltään ja ominaisuuksiltaan. Tässä muuntajalla tarkoitetaan suurta ulko- ja sisäkytkinlaitoksiin soveltuvaa tehomuuntajaa (*power transformer*). Kuvassa 5.5 on 400 kV tehomuuntaja. Toisinaan voidaan puhua myös sähköaseman päämuuntajasta.



Kuva 5.5 Tehomuuntaja muuntajabunkkerissa.

Muuntaja on sähkölaite, joka muuntaa vaihtosähköjärjestelmässä jännitettä ja virtaa. Tämä prosessi saa muuntajan rautasydämen ja käämit lämpenemään, minkä seurauksena muuntaja pitää jäähdyttää. Suuret muuntajat ovat niin sanottuja öljymuuntajia, sillä niiden jäähdytysaineena käytetään öljyä. Muuntajan varsinaisen tehtävän suorittavat kää-

mitykset ja rautasydän. Muita muuntajan osia ovat tukirakenteet, eristimet, muuntajaöljy ja jäähdytyslaitteet. (Korpinen et al. 1998)

Muuntajan jännitteen ja virran suhdetta kontrolloidaan käämien kierrosmäärien suhteella. Mitä suurempi on käämien kierrosmäärien suhde, sitä suurempi on tulevan jännitteen U_1 ja lähtevän jännitteen U_2 ero. Yleensä pyritään siihen, että käyttöjännitteiden keskinäinen suhde olisi vähintään kaksi. Eniten rakennettujen verkkojen jännitteiden suhteet ovat tyypillisesti välillä 4-6. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 54)

5.2.2 Mittamuuntajat

Mittamuuntajat ovat erikoisrakenteisia muuntajia, joita käytetään mittaus- ja suojaustekniikassa. Käytetyimmät mittamuuntajat ovat virtamuuntaja (*current transformer*) ja jännitemuuntaja (*potential transformer*). Kuvassa 5.6 on esitetty virtamuuntaja. Ne eroavat päämuuntajasta erityisesti siinä, että niiden läpi kulkee huomattavasti pienempi sähköteho. (Korpinen et al. 1998)



Kuva 5.6 Virtamuuntaja, johon liittyy kaksi johdinta. Jännitemuuntaja näyttää samantaiselta, mutta siihen liittyy vain yksi johdin.

Mittamuuntajien tehtävinä on eristää mittauspiiri päävirtapiiristä, mahdollistaa suojalaitteiden standardointi tiettyihin mitoitusarvoihin, suojella mittareita (sähköiseltä) ylikuormitukselta ja mahdollistaa mittareiden ja releiden vapaa sijoittelu (Elovaara & Haarla 2011b, s. 198). Mittamuuntajia käytetään, koska mittareiden ja releiden rakentaminen suurille virroille ja jännitteille on teknisesti vaikeaa (Korpinen et al. 1998).

5.2.3 Katkaisijat

Katkaisija (*circuit breaker*) on verkon tärkein ja kallein kytkinlaite. Sen tehtävänä on katkaista ja sulkea kuorma- ja vikavirrat. Katkaisun tulee tapahtua niin, että muulle verkolle aiheutuu mahdollisimman vähän häiriötä eikä katkaisija vaurioidu. Katkaisija pysyy sekä avaamaan että sulkemaan virtapiirin. Niitä on sekä manuaalisesti että automaattisesti toimivia. Tyypillinen automaattinen katkaisijatoiminta on avautuminen suurimman ylivirran, kuten oiko- tai maasulkuvirran, seurauksena. Katkaisijat ovat kytketty releisiin, jotka antavat niille avauskäskyn. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 162; Heikkilä 2004; Korpinen et al. 1998)

Virtapiirin katkaisussa virta ei katkea heti katkaisijan koskettimien avautuessa, vaan virtapiiri pysyy suljettuna valokaaren välityksellä. Valokaari on ilmiö, joka syntyy kahden elektrodin välisen sähkökentän noustessa niin suureksi, että sähkövirta purkautuu sähköä johtamattoman materiaalin, kuten ilman, läpi. Tähän perustuu kaikkien katkaisijoiden toiminta. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 163-164)

Valokaaren jäähdytys ja sammutus vaatii sopivan väliaineen niin sanotussa katkaisukammiossa. Katkaisijat voidaan jakaa katkaisukammioiden käyttämän väliaineen mukaan muun muassa seuraavasti (Elovaara & Haarla 2011b, s. 168-169):

- ilmakatkaisijat
- öljykatkaisijat
- SF₆-katkaisijat eli kaasukatkaisijat
- tyhjiökatkaisijat.

Näistä kahta ensimmäistä mallia ei enää valmisteta. Katkaisijalajit voidaan erotella myös sen mukaan ovatko katkaisukammiot suurjännitteen määräämässä potentiaalissa (*live-tank circuit breakers*) vai maan potentiaalissa (*dead-tank circuit breaker*). Suomessa käytetään pääsääntöisesti niin sanottuja live-tank katkaisijoita, kun taas dead-tank katkaisijat ovat suosittuja erityisesti Yhdysvalloissa (Elovaara & Haarla 2011b, s. 170). Kuva 5.7 havainnollistaa erilaisia live-tank-katkaisijoita.



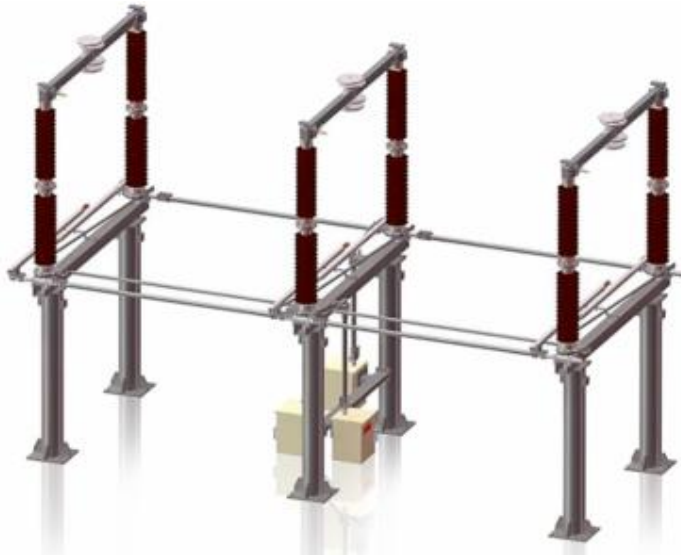
Kuva 5.7 Erilaisia katkaisijoita. Vasemmalta oikealle: 110 kV öljykatkaisija, 110 kV SF₆-katkaisija ja 400 kV erottava katkaisija.

Kuvan vasemmanpuoleinen ja keskimäinen katkaisija ovat niin sanottuja 3-napaisia katkaisijoita, eli niiden kolme napaa ovat kaikki tuettu samalle tukirakenteelle. Kuvan oikeanpuoleinen katkaisija on puolestaan yksinapainen katkaisija, sillä sen yksi napa on tuettu omalle pilarilleen. Niitä on kuitenkin aina kolme vierekkäin, sähkön kolmea vaihetta varten.

5.2.4 Erottimet

Erottimien (*disconnector*) tehtävänä on muodostaa turvallinen avausväli erotettavan virtapiirin ja muun laitoksen välille. Käytännössä tämä tarkoittaa, että niiden pitää pysyä pitämään kaksi verkon osaa sähköisesti erillään toisistaan. Näin saadaan haluttu laitoksen osa jännitteettömäksi turvallista työskentelyä varten. Avausvälin tulee olla näkyvä ja luotettava.

Erottimien virtaa kuljettavat osat ovat liikkuvat veitset ja kiinteät koskettimet. Erotintyyppistä riippuen se voi aueta joko vaaka- tai pystysuunnassa. Lisäksi erotintyyppi riippuu tarvittavien tukieristinten määrästä. Yleisin erotinmalli on kaksipilarinen vaakatasossa liikkuva kiertoerotin, joka sopii hyvin kytkinlaitoksiin rinnakkain asennettavaksi (ks. kuva 5.8).



Kuva 5.8 Kaksipilarinen vaakatasossa liikkuva kiertoerotin. (ABB [viitattu 10.5.2014])

Erotinta, toisin kuin katkaisijaa, ei ole tarkoitettu kuormitetun virtapiirin avaamiseen tai sulkemiseen. Suomessa auki- ja kiinniohjauksessa käytettävien erottimien lisävaatimuksena on kyky toimia kovien pakkasten aikana. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 190-193)

5.2.5 Kompensointilaitteet

Useat sähköverkon laitteet tarvitsevat toimiakseen loistehoa, jota voidaan ottaa verkosta tai tuottaa siihen tarkoitetuilla kompensointilaitteilla (ks. kuva 5.9).



Kuva 5.9 Kompensointilaitteita. Vasemmalla reaktori ja oikealla kondensaattori. (Eurolaite [viitattu 9.5.2014]; ABB [viitattu 9.5.2014])

Tarvittavaa loistehoa voidaan tuottaa joko tahtikoneilla tai rinnakkaiskondensaattoriparistoilla (*shunt capacitor*), joista useimmiten käytetään jälkimmäistä. Niiden toiminta perustuu siihen, että ne pystyvät käyttämään verkkoa turhaan kuormittavaa loistehoa siirtäen sitä sähkölaitteille. Liiallinen kompensointi aiheuttaa kuitenkin kompensoidun verkon jännitteen nousun, minkä vuoksi loistehoa on voitava kuluttaa myös verkosta. Tähän tarkoitukseen on kehitetty rinnakkaiskuristin eli reaktori (*shunt reactor*), joka toimii päinvastaisella periaatteella kuin kondensaattori. (Korpinen et al. 1998)

Suomen suurjännitereaktorit ovat pääosin ilmasydämissä, ilmajäähdytteisiä ja kiinteää eristettä käyttäviä reaktoreita (*air core reactor*). Ne kootaan kolmesta yksivaiheisesta kelasta, jotka koostuvat samankorkuisista sylinterinmuotoisista käämeistä (Elovaara & Haarla 2011b, s. 226). Kondensaattoreiden sekä reaktoreiden avulla ylläpidetään loistehon tasapainoa verkossa.

5.3 Sähköasemien suunnittelu ja erityiskysymyksiä

Sähköverkon suunnittelu määrittää sähköaseman rakenteen, eli onko sen tehtävänä pelkästään siirtää tai jakaa sähköä, yhdistääkö se saman tai kahden eri jännitetason johtoja ja tullaanko se toteuttamaan sisä- vai ulkokytkinlaitoksena (Elovaara & Haarla 2011b, s. 96). Merkittävin rakennesuunnitteluun vaikuttava tekijä on se, toteutetaanko sähköasema sisä- vai ulkokytkinlaitoksena. Sisäkytkinlaitos vaatii rakennuksen, ulkokytkinlaitos ei. Tästä johtuen niissä käytetyt rakenteet ja niillä esiintyvät kuormitukset ovat erilaiset. Sisäkytkinlaitosten suunnittelu onkin lähempänä tavanomaisempaa rakennusten suunnittelua. Tässä työssä tarkastellaan nimenomaan ulos rakennettavia sähköasemia eli ulkokytkinlaitoksia.

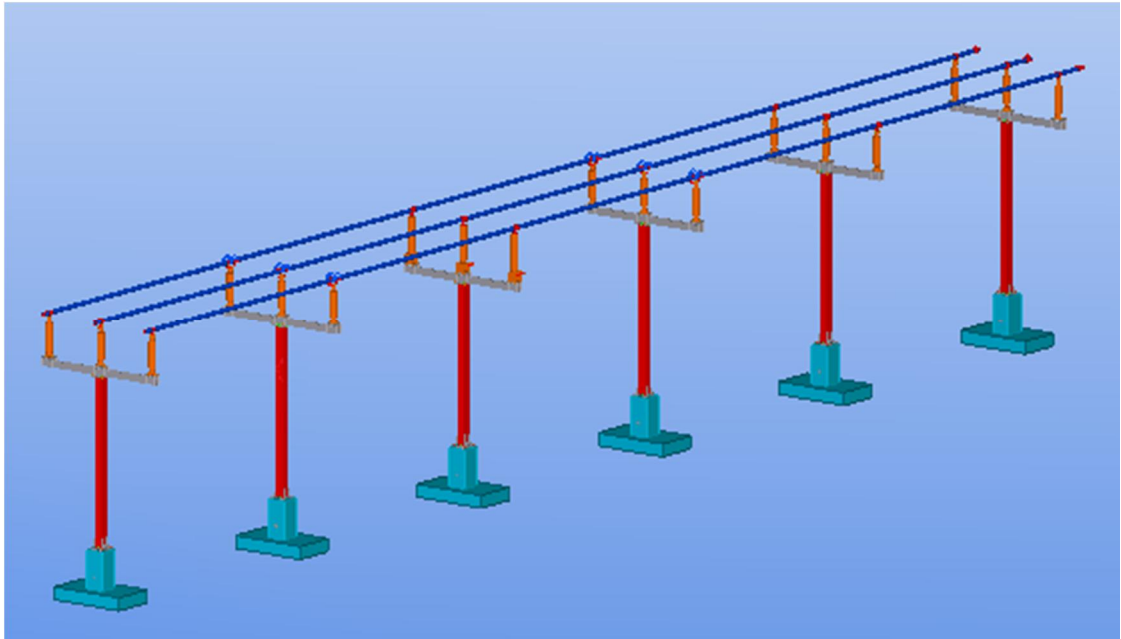
Sähköasemat voidaan luokitella erikoisrakenteiksi, sillä ne eivät kuulu tavanomaisen rakenteiden piiriin. Niiden rakenteisiin vaikuttaa kuormia, joita Eurokoodissa ei käsitellä. Näitä kuormia ovat erityisesti oikosulku- ja kytkentävoimat. Tavanomaisissa rakennuksissa täytyy huomioida erilaiset hyötykuormat, mutta sähköasemilla niitä ei esiinny. Poikkeuksena ovat mahdolliset hoitotasot ja huoltotien liikennöitävät tilat, joihin saattaa kohdistua merkittäviä kuormia muuntajan kuljetuksen johdosta.

Sähköaseman rakenteiden tehtävä on kannatella sähkölaitteita (minkä vuoksi niitä kutsutaan tukirakenteiksi). Sähköä siirtävät osat on aina eristettävä tukirakenteista eristimillä, jotka sähköasemilla ovat niin sanottuja tukieristeitä. Ne kestävät taivutusta ja puristusta. Nyrkkisääntönä on, että kaikki laitteet asennetaan teräsrakenteiden varaan; poikkeuksena muuntajat ja reaktorit, jotka asennetaan betoniperustusten varaan.

Ulkokytkinlaitoksen tukirakenteet ovat usein yksinkertaisia teräsrakenteita, kuten palkkeja, pilareita tai ristikoita, jolloin niiden omapaino on helppo määrittää. Teräsrakenteet kiinnitetään betoniperustuksille, jotka voivat olla joko paikallavalettuja tai elementeistä valmistettuja. Menettely on melko suoraviivaista, mutta sähköasemilla on joitain erityiskysymyksiä, jotka suunnittelussa tulee huomioida. Tarkastellaan niitä seuraavaksi.

5.3.1 Kokoojakiskot

Sähköaseman kokoojakiskot muodostavat suunnittelun kannalta tärkeän kokonaisuuden. Yksinkertaisesta rakenteestaan huolimatta, niissä vaikuttaa useita kuormia, jotka ovat ulkokytkinlaitoksen suunnittelun kannalta keskeisiä. Kuva 5.10 havainnollistaa tyyppillistä kokoojakiskoa.



Kuva 5.10 Kokoojakisko. Sinisellä on merkitty putkikiskot, oranssilla tukieristimet, harmaalla ja punaisella teräksinen tukirakenne sekä vihreällä peruspilarit ja anturat.

Kokoojakiskot toteutetaan nykyään putkista ja niissä kulkee sähkövirta. Aiemmin esitetyistä kiskojärjestelmistä riippumatta, kiskoissa on aina kolme putkea rinnan, mikä johtuu sähköön kolmivaihejärjestelmästä (L1, L2, L3). Yhdessä nämä aiheuttavat kiskoissa mekaanisia oikosulkuvoimia, jotka siirtyvät kiskoilta eristimien kautta tukirakenteille. Kiskoihin liittyy johtokentän johtimet, jotka ovat kiskoja vasten kohtisuorassa. Myös niissä esiintyy oikosulkuvoimia, mutta niiden vaikutus on usein kuitenkin pieni, sillä johtimien etäisyydet ovat selvästi lyhyempiä kuin kiskojen.

Kiskojen mitoitukseen liittyviä kuormia ovat lisäksi jää ja tuuli. Myös värähtely saattaa joissain tapauksissa tulla kyseeseen. Kuormituksista on tarkemmin kerrottu luvussa 7.

5.3.2 Muuntajarakennukset

Ulkokytkinlaitoksilla muuntajarakennukset (tai muuntajabunkkerit) ovat asemarakennusten ohella ainoat varsinaiset rakennukset. Kaikilla sähköasemilla ei muuntajia varten ole kuitenkaan rakennettu erillistä rakennusta. Suurjänniteverkkoon kuuluville 110 kV ja sitä suuremmille muuntajille rakennetaan tyyppillisesti erillinen muuntajarakennus. Se muun muassa suojaa muuntajaa ilkivallalta. Toinen ja oleellisempi syy on kuitenkin tulipalo ja siitä mahdollisesti aiheutuvat räjähdykset. Muuntajat sisältävät niiden koosta

riippuen satoja tai jopa tuhansia litroja eristysnestettä, kuten öljyä, joten niiden palo-kuorma on merkittävä. Palovaaraa aiheutuu sähköaseman rakenteille ja muille muuntajille. Muuntajien sijoitteluun on annettu ohjeistusta standardissa SFS 6001, joka määrittelee ohjearvot muuntajan ja muiden osien välisille etäisyyksille (ks. liite 2). Näitä etäisyyksiä voidaan pienentää, mikäli käytetään automaattista palonsammutuslaitteistoa ja/tai suojaseiniä (SFS 6001, s. 57). Erottava seinä ajatellaan tällöin osastoivana seinänä. Erottavan seinän ominaisuuksiin vaikuttaa eristysneste ja nestemäärä.

Muuntajien koko ja paino vaihtelee huomattavasti sen mukaan, kuinka suurta jännitettä ne muuntavat. Tyypillinen 110 kV muuntaja painaa 40-70 tonnia, 400 kV muuntajat enemmän. Nämä seikat vaikuttavat olennaisesti muuntajan kuljetukseen, kuljetustien kantavuuteen ja muuntajan perustusrakenteisiin.

5.3.3 Reaktorit

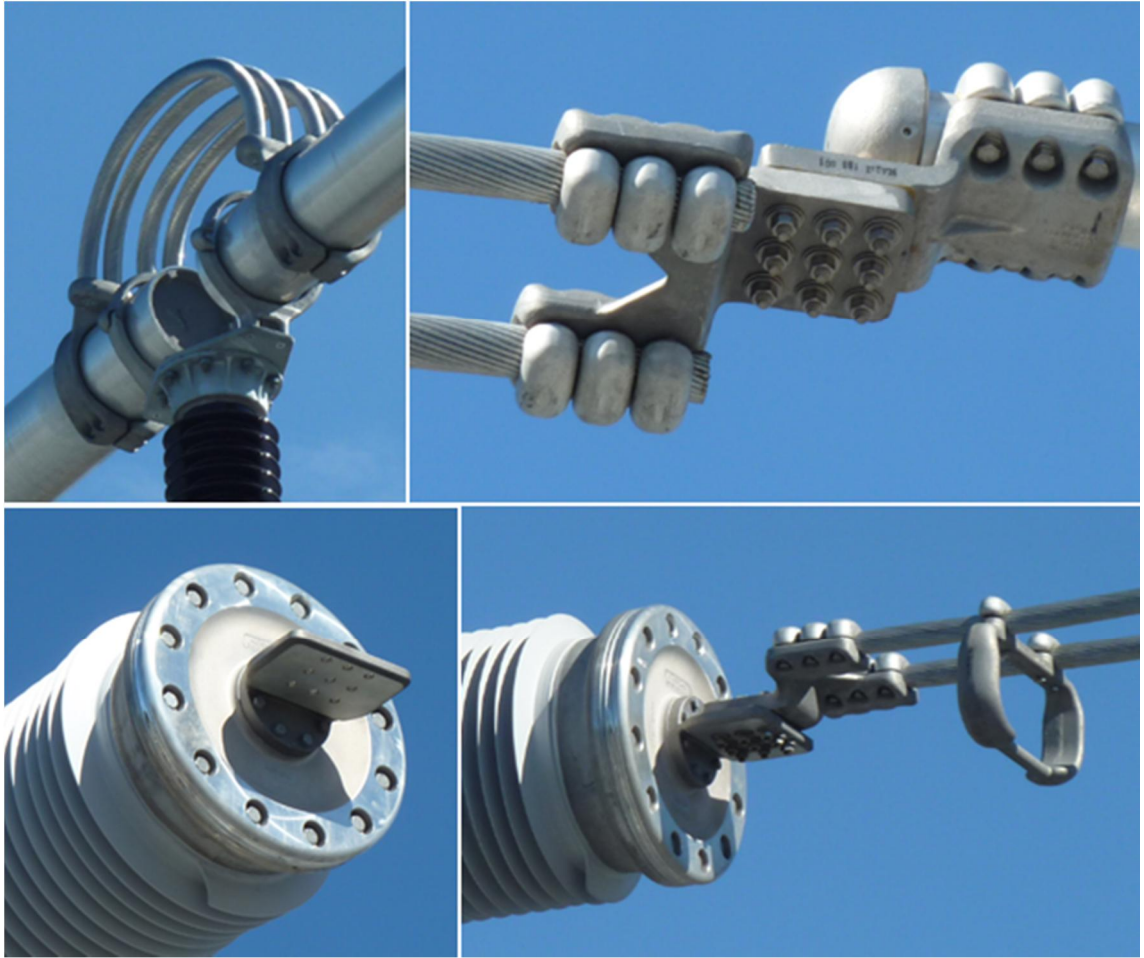
Reaktorit (ilmasydämiset) synnyttävät ympärilleen voimakkaan magneettikentän, jonka seurauksena sen lähellä oleviin metalleihin indusoituu sähkövirta. Tämä pätee erityisesti silmukan muotoisiin metalliosiin, kuten metalliaitaan tai haoille. Lämpeneminen ei aiheuta haittaa itse laitteelle, mutta se on huomioitava reaktorin lähellä olevissa metallirakenteissa. Tästä syystä reaktorin perustuksia ei tule raudoittaa eikä asentaa teräsrakenteiden varaan. Ne tuetaan yleensä tukieristimillä ja alumiinirakenteilla, jotka pultataan perustuksiin. Joitain ohjeistavia arvoja löytyy esimerkiksi ASCE:n raportista (ASCE 2008, s. 109):

1. Betonirakenteille voidaan käyttää teräsradoituksen sijaan muovikuituja tai anti-magneettisia ruostumattomia pultteja, kun etäisyys on $\leq D/2$ reaktorista. Etäisyyden ollessa $> D/2$ reaktorista, niin voidaan käyttää normaaleja pultteja. (D on reaktorin halkaisija)
2. Alumiinirakenteita ei tule olla $\leq D/2$ päässä reaktorista.
3. Silmukkamaisia lenkkejä ei tule olla $\leq D$ päässä reaktorista. Tässä silmukkamaisella lenkillä tarkoitetaan kaikkia teräsrakenteita, jotka mahdollistavat sähkövirran silmukassa.

Reaktoreiden magneettikenttä on vaarallinen myös ihmisille, minkä vuoksi niiden ympärille on rakennettava erillinen suoja-aita. Magneettikentän vaikutus ulottuu myös aitaan, joten se rakennetaan yleensä puusta.

5.3.4 Sähköasemaliittimet

Sähköasemaliittimien (*terminal connection*) tarkoituksena on toimia sähkövirran välittäjänä johtimelta laitteelle. Kuvassa 5.11 on esitetty joitain sähköasemaliittimiä. Niitä ei ensisijaisesti ole tarkoitettu kantamaan laitteiden ja johdinten kuormaa. Kuitenkin, myös niihin kohdistuu voimia ja taivutusmomenteja, jotka vaativat liitokselta mekaanista kestävyyttä. Taipuisat johtimet tulee asentaa laitteisiin riittävän löysästi, jotta laitteiden aiheuttamat liikkeet eivät aiheuttaisi pakkovoimia liitoksiin. (ASCE 2008, s. 26)



Kuva 5.11 Sähköasemaliittimiä. Ylhäällä vasemmalla: kahden putkikiskon välinen lämpöliikkeen salliva liitin. Ylhäällä oikealla: johtimen ja erottimen välinen liitin. Alhaalla katkaisija ennen johdinliitosta (vas.) ja kun johdin on liitetty (oik.).

Liittimiä on kattava valikoima erilaisiin tilanteisiin. Alla on listattu esimerkinomaisesti muutama liitintyyppi (Energel [viitattu 9.4.2014]):

- yhdensuuntaisliittimet köysi-putki-liitoksiin
- T-liittimet kohtisuoriin liitoksiin
- pronssiliittimet kupari-kupari-liitoksiin.

6 VOIMAJOHDOT

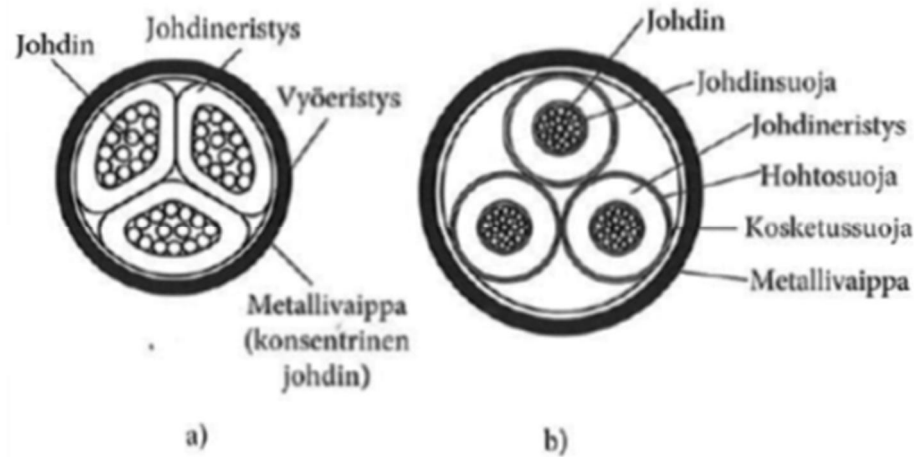
Termi *voimajohto* viittaa energiantuotantoprosessiin, jossa *voimalaitoksissa* tuotettua sähköenergiaa siirretään *johtoja* pitkin loppukäyttäjille. Tässä voimajohdolla ymmärretään sähköä siirtävien johdinten sekä niitä kannattelevien tukirakenteiden muodostamaa kokonaisuutta. Voimajohtojen suunnittelua ohjaava standardi (SFS-EN 50341-1) käyttää niistä termiä ilmajohto. Puhekielessä puhutaan usein myös voimalinjoista.

Voimajohdot ovat yksi nyky-yhteiskunnan tärkeimmistä infrastruktuureista. Ne muodostavat näkyvimmän osan sähkönsiirtoverkosta. Vaikka tässä työssä keskitytään lähinnä sähköasemien suunnitteluun, niin on tarpeen käydä läpi myös keskeisimmät voimajohtoihin liittyvät asiat. Tässä luvussa kerrotaan sähköä siirtävistä johtimista ja niiden varusteista, tyypillisistä pylväsrakenteista sekä niiden suunnittelua koskevista asioista. Lukuun on myös lyhyesti sisällytetty voimakaapelit.

6.1 Ilmajohdot ja kaapelit

Sähkönsiirrossa ja -jakelussa käytetään sähköjohtoja, jotka voivat olla joko ilmajohtoja tai kaapeleita. Niiden ensisijainen tehtävä on johtaa sähkövirtaa, mutta myös kestää mekaaniset rasitukset. Ilmajohdojen ja kaapeleiden johtimet koostuvat yhdestä tai useammasta (yleensä) alumiini- tai kuparilangasta. Ilmajohdojen eristeenä on ilma. Kaapeleiksi puolestaan määritellään yleisesti kaikki sellaiset johdot, joiden jännitteellisten osien eristysmateriaalina toimii jokin muu kuin ilma.

Tarkemmin määriteltynä kaapeli on kosteutta, korroosiota ja mekaanista rasitusta kestävä johto, jossa on yksi tai useampi toisistaan eristetty johdin. Rakenteellisesti kaapelit jaetaan eristeeseen kohdistuvan jänniterasituksen mukaan vyöeristettyihin tai H-suojattuihin kaapeleihin (ks. kuva 6.1). Vyöeristyksellä tarkoitetaan useiden johtimien ympärille tehtyä johdineristysten ja maan välistä eristystä. Kaapeleissa, jossa jokaisella johtimella on eristysten päällä hohtosuoja, käytetään nimitystä H-suojattu kaapeli.



Kuva 6.1. Kaapelit ovat rakenteeltaan joko a) vyöeristettyjä, tai b) H-suojattuja. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 311)

Kaapelien poikkipinta-alat ovat normaalikäytössä 25-2000 mm² riippuen tulevatko ne pien-, keski- vai suurjänniteverkkoon. Suuret jännitteet vaativat suuren poikkileikkauksen. Ongelmana kuitenkin on, että suurilla jännitteillä sähkökentän voimakkuus kasvaa eristykselle usein liian suureksi, minkä vuoksi yli 2000 mm² poikkileikkauksia käytetään harvoin. Avojohto on ilmajohdon erikoisnimitys. Siinä jokainen johdin on erikseen kiinnitetty eristimiin tai muihin kannakkeisiin. Keski-jänniteverkossa käytetään myös niin sanottuja päällystettyjä avojohtoja, eli PAS-johtoja. Pienemmän tilan tarpeen vuoksi niitä on asennettu paljon muun muassa kadunvarsille. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 250, 286, 307)

Määräyksissä ilmajojtojen ja kaapeleiden jakoa ei tehdä eristysmateriaalin vaan asennettavuuden mukaan. Ilmajohdot asennetaan ulos pylväiden varaan, kaapelit sisällä hyllyihin ja ulkona maahan tai veteen. Eri valmistajilla on myös olemassa kaapelikanavaelementtejä, joita käytetään muun muassa sähköasemilla ja teollisuusalueilla (ks. kuva 6.2).



Kuva 6.2 Kaapelikanavaelementtejä tehtaalla. (Rudus 2014)

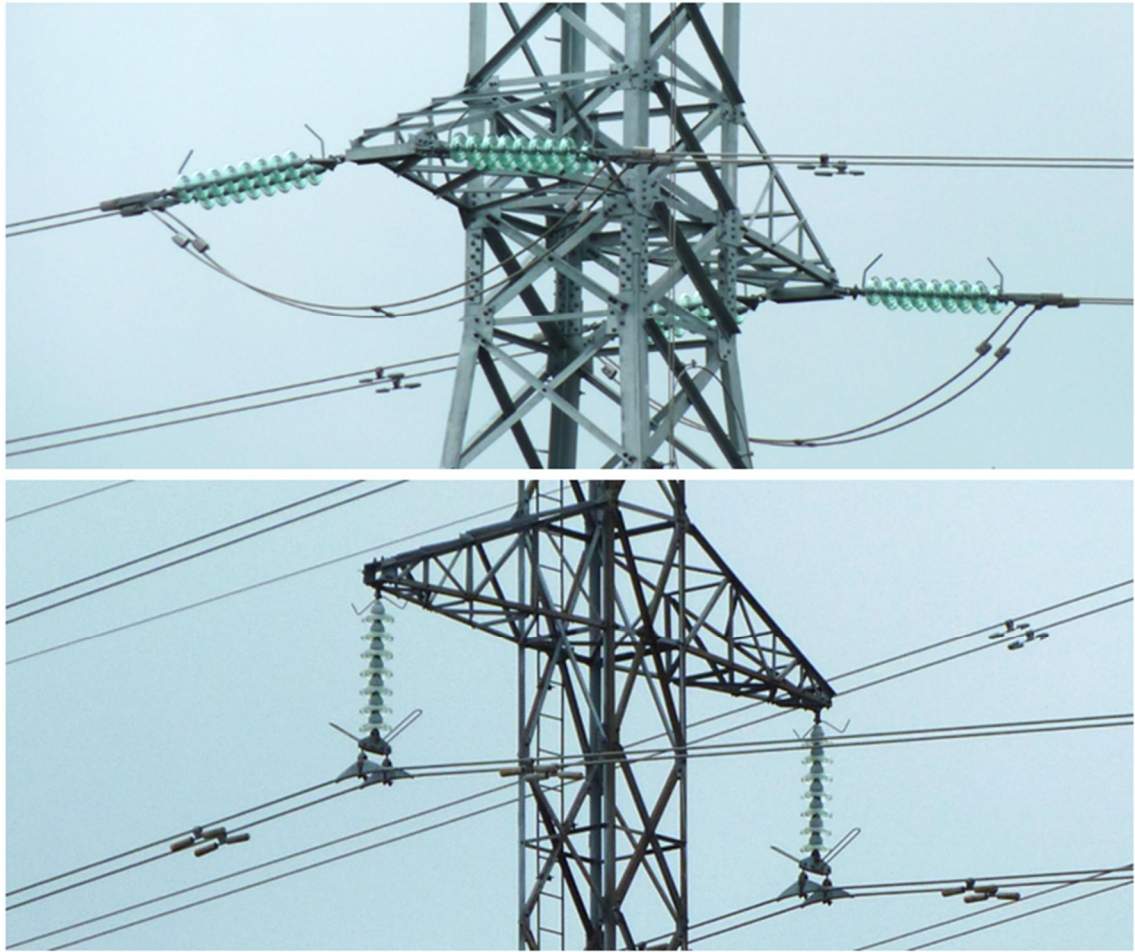
Elementit mitoitetaan normaalisti niille tulevan kuormituksen mukaan. Kaapeleita voidaan käyttää sekä sisä- että ulkokytkinlaitoksissa. Niiden käyttö ja suunnittelu on luonteeltaan hyvin erilaista kuin ilmajohtojen.

6.2 Pylväät

Pylväsrakenteiden tehtävänä on kannatella johtimia, siirtää niiden kuormat perustusten kautta maaperään ja muodostaa turvallinen etäisyys ympäristöön nähden. Pylväs koostuu kantavasta runko-osasta, yhdestä tai useammasta orresta ja ukkospukeista. Kaikki pylväät eivät sisällä ukkospukkeja, vaan ainoastaan ne, joiden johdot on suojattu ukkosjohtimilla. Suomessa tämä tarkoittaa lähes kaikkia suurjänniteverkkoon lukeutuvia johtoja. Mikäli pylväässä on ukkospukit, ovat ne aina muita orsia korkeammalla. Pylväiltä vaaditaan eri ominaisuuksia niiden käyttötarkoituksen mukaan. Seuraavaksi on esitetty luettelo yleisistä pylvästyypeistä:

- kannatinpylväät
- kulmapylväät
- kiristyspylväät
- päätepylväät.

Kannatinpylväät (tai ripustuspylväät) ovat usein suorilla johto-osuuksilla käytettyjä pylväitä, joihin ei kohdistu merkittäviä veto- tai vaakavoimia. Tämä johtuu siitä, että niissä johdot pääsevät vapaasti liikkumaan johdon suuntaisesti. Kannatinpylväät ovat voimajohdon peruspylväitä, joita voidaan asentaa monta peräkkäin. Tyypillisiä kannatinpylväitä ovat 110 kV (ks. kuva 6.5f) ja 400 kV (ks. kuva 6.5e) harustetut pylväät. Kulmapylväät ovat pylväitä, joiden kohdalla ilmajohtojen suunta muuttuu, mikä aiheuttaa pylväsrakenteeseen suuria johdonsuuntaisia voimia. Niitä käytetään paljon tiheään asutuilla ja ahtailla alueilla, jossa ilmajohtojen reitti ei noudattele suoraa linjaa. Kiristyspylväät toimivat tietynlaisina voimajohdon ankkureina. Niihin kiinnitetään ilmajohtojen välittämät kuormat. Maastossa kiristyspylväät on helppo erottaa kannatinpylväistä (ks. kuva 6.3).



Kuva 6.3 Kiristyspylväs (ylhäällä) ja kannatinpylväs (alhaalla).

Kiristyspylväät eroavat ulkoisesti kannatinpylväistä kahdella tavalla. Ensinnäkin kiristyspylväissä eristimet ovat vaakasuorassa, kun kannatinpylväissä ne ovat pystysuorassa. Toiseksi kiristyspylväissä sähkönsiirto katkeaa kiristyksestä johtuen, minkä vuoksi niihin asennetaan löysät liitososat, jotka siirtävät sähkövirran puolelta toiselle.

Kiristyspylväitä rakennetaan paljon harvemmin kuin kannatinpylväitä. Kahden kiristyspylvään välissä voi olla monta kannatinpylvästä, jotka kaikki välittävät kuorman kiristyspylväille. Tämän seurauksena kiristyspylväisiin kohdistuu pylväsrakenteista suurimmat johdinkuormat, minkä vuoksi ne ovat myös kooltaan suurimpia. Kiristyspylväseen kiinnitetään ilmajohdot aina molemmiin puolin. Johtojen vetovoima voi kuitenkin erota paljonkin, mikä aiheuttaa pylväälle kaatavaa momenttia.

Päätepylväät tai portaalit ovat kiristyspylväitä, joihin johto on kiinnitetty vain toispuoleisesti. Tällaisia pylväitä ovat esimerkiksi sähköasemilla sijaitsevat voimajohdon päätepylväät (ks. kuva 6.4). (Elovaara & Haarla 2011b, s. 264)



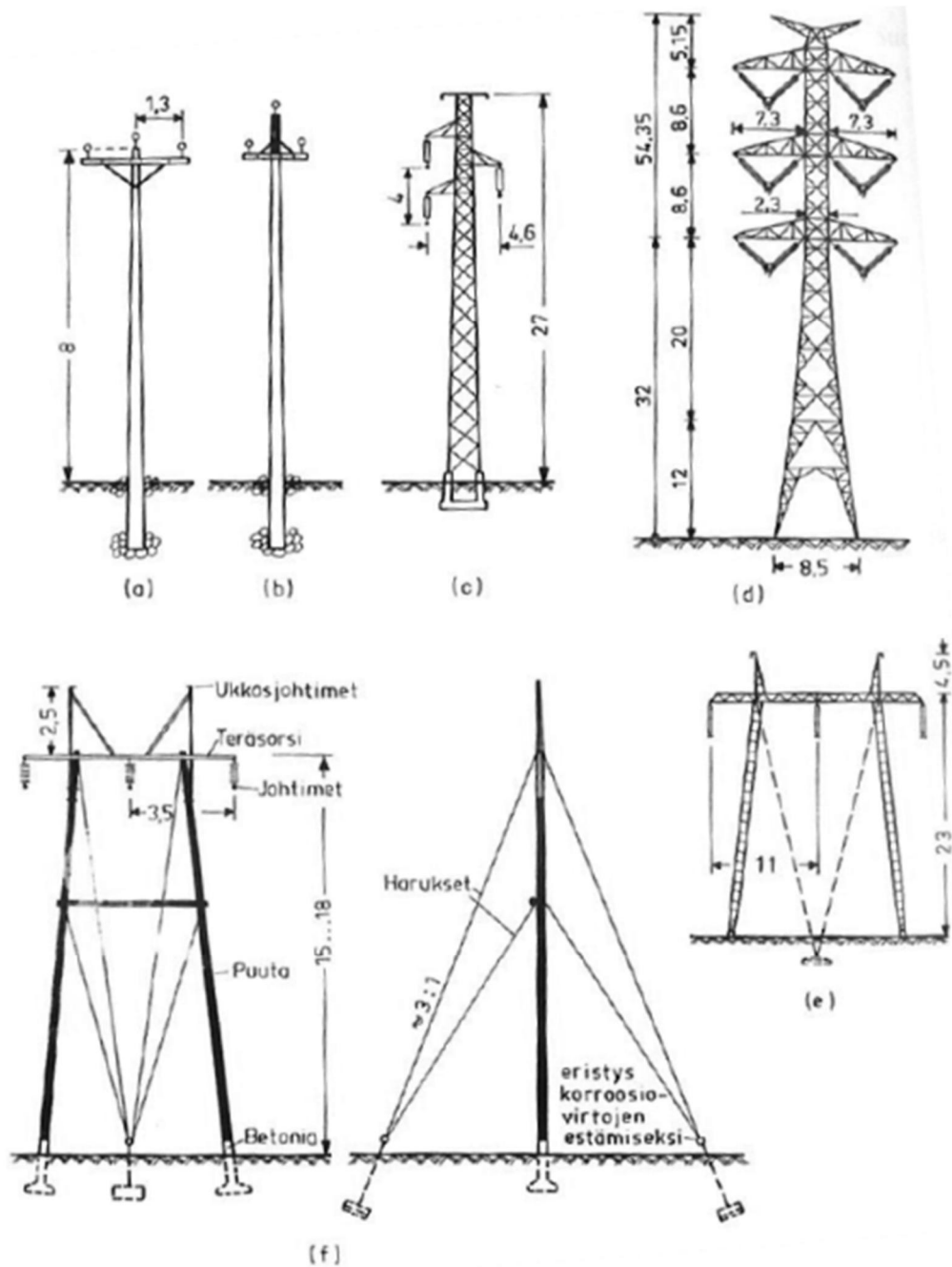
Kuva 6.4 Päätepylväs eli portaali. Kuvan portaali on kytketty sähköaseman kytkinkenttään, josta lähtee johtolähdöt eri kaupunkeihin.

Pylväiden materiaalina voidaan käyttää puuta, terästä tai alumiinia. Myös betonista valmistettuja pylväsrakenteita maailmalta löytyy, mutta Suomessa niitä ei ole käytetty. Puu sopii hyvin käytettäväksi pienempien jännitteiden siirtoon. Puun käyttöä suosii sen edullinen hinta ja saatavuus. Huonona puolena on puupylväiden vaatima kyllästys, joka nykyisten ympäristövaatimusten myötä asettaa puun käytölle rajoitteita. Kyllästetyn puun käyttöä on tulevaisuudessa vähennettävä tai keksittävä uusia menetelmiä puun pitkäaikaiskestävyyden parantamiseksi. Myös suuremmat jännitteet (≥ 110 kV) vaativat korkeampia pylväsrakenteita, mikä rajoittaa puun käyttöä. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 265)

Teräspylväitä käytetään suuremmilla jännitteillä sekä suurta rakennekorkeutta ja lujuutta vaadittaessa. Teräksiset pylväät ovat usein ristikkopylväitä, mutta myös putkipylväitä voidaan käyttää. Kaikki teräksiset materiaalit on suojattava korroosiolta joko kuumasinkityksellä tai metalliruiskuttamalla. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 265; SFS-EN 50341-1, s. 101)

Suomessa on tehty jonkun verran myös alumiinista valmistettuja pylväitä, mutta niiden valmistus on lopetettu. Syynä tähän on alumiinipylväille ominainen jännityskorroosio, joka johtaa pahimmassa tapauksessa rakenteen sortumiseen. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 265)

Seuraavaksi käydään läpi tyypillisimmät Suomessa käytetyt pylväsrakenteet (ks. kuva 6.5).



Kuva 6.5. Tyypillisiä Suomessa käytettäviä pylväsrakenteita. a) ja b) 20 kV puupylväs. c) Vapaasti seisova 110 kV teräsristikkopylväs I-ketjuin. d) Vapaasti seisova 400 kV kaksoisjohdin ristikkopylväs V-ketjuin. e) 400 kV harustettu metallipylväs ja f) 110 kV harustettu puupylväs. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 266)

Pien- ja keskijänniteverkon pylväät ovat pääsääntöisesti I-pylväitä. Pienjänniteverkossa johto ripustetaan yleensä pylvään koukkuun ja keskijänniteverkossa pylvään päähän asennettuun orteen. Päällekkäisten johtimien käyttöä on näissä pyritty vähentämään, koska jääkuorman pudotessa alempaan johtoon se saattaa ponnahtaa ylöspäin ja koskettaa ylemmää johtoa. Tilanpuutteen vuoksi päällekkäisiä johtoja kuitenkin joudutaan käyttämään.

Alue- ja jakeluverkossa eniten käytetty pylväsrakenne on harustettu portaalipylväs (eri asia kuin päätepylväs eli portaali). Harustuksen ansiosta portaalipylväisiin kohdis-

tuu lähinnä vain puristusta tai vetoa, mutta ei taivutusta. Ne ovat rakenteeltaan paljon kevyempiä kuin itsestään seisovat (harustamattomat) pylväät. Tämän vuoksi ne ovat myös matalampia. Kevyet ja matalat pylväät ovat edullisempia ja vähemmän alttiita salamaniskuille.

Yksi voimalinja koostuu usein monista pylvästyypeistä. Tämä pätee erityisesti taa-jamissa ja vaikeakulkuisessa maastossa, kun taas suorilla linjaosuuksilla samanlaisia pylvästyyppejä voi olla peräkkäin useitakin. Kunkin pylvään tyyppi ja rakenne riippuu sen käyttötarkoituksesta. Myös taloudelliset syyt ovat keskeisessä osassa. Esimerkiksi kantaverkon voimajohdossa pääosa pylväistä on harustettuja kannatinpylväitä. Kiristyspylväitä on tyypillisesti vain 20-30 km välein (Laine 2014).

6.3 Johtimet ja niiden varusteet

Johtimien pääasiallinen tarkoitus on johtaa sähköä. Ja aivan kuten sähköaseman kiskoissa, myös johtimissa käytetyimmät metallit ovat kupari, alumiini, seosalumiini ja teräs. Suurjänniteverkoissa käytetään pääsääntöisesti teräsvahvisteisia alumiinijohtimia. Kes-kijänniteverkoissa käytetään teräsvahvisteisten alumiinijohtimien lisäksi seosalumiinista valmistettuja johtimia. Edellä mainitut metallit eivät kuitenkaan ole mekaanisesti riittä-vän kestäviä. Tämän vuoksi johtimissa käytetään terästä, jonka tehtävänä on parantaa johtimen mekaanista lujuutta. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 278)

Suomessa käytössä olevia johdintyyppiejä ovat esimerkiksi keskijänniteverkossa käytetyt Sparrow ja Raven sekä suurjänniteverkossa käytetty Finch. Johdintyyppien suurin erottava tekijä on niiden poikkipinta-ala ja suurin rajoittava tekijä niiden termi-nen kestävyys. Suuret lämpötilat aiheuttavat johdinten mekaanisen lujuuden heikkene-misen, mistä aiheutuu samalla suuret riippumat.

Johdinvarusteita ovat muun muassa varoituspallo ja värähtelyvaimentimet. Varoi-tuspalloja on kahdenlaisia: lentoestepalloja ja lintupalloja. Lentoestepallot ovat hal-kaisijaltaan noin metrin kokoisia ja melko raskaita, joten niiden paino tulee huomioida suunnittelussa. Väriltään ne ovat punaisia tai valkoisia. Lentoestepallot asennetaan voi-majohdon ylimpiin johtoihin eli ukkosjohtimiin. Lintupalloja ovat huomattavasti pie-nempiä, vain noin 20 cm halkaisijaltaan ja väriltään oransseja. Suunnittelun kannalta tärkein johdinvaruste on kuitenkin värähtelyvaimennin, jonka tarkoituksena on estää tuulen aiheuttamaa johdon värähtelyä. Ne ovat väriltään mustia ja muistuttavat ulko-näöltään pieniä käsipainoja. Värähtelyvaimentimia käytetään 110 kV ja sitä suuremmil-la jännitteillä (Elovaara & Haarla 2011b, s.284).

6.4 Voimajohtojen suunnittelu

Voimajohdot koostuvat kahdesta erillisestä osasta: johdoista ja niiden osista. Yhdessä ne muodostavat kokonaisuuden, vaikka ominaisuuksiltaan ovatkin erilaisia. Johdot ovat köysiä, jotka otaksutaan äärettömän taipuisiksi rakenneosiksi. Ne pystyvät välittämään vain vetovoimaa. Myös vallitseva lämpötila vaikuttaa johtojen käyttäytymiseen ja mitoi-

tukseen. Mitä suurempi lämpötila, sitä suurempi on johtojen riippuma. Johtojen kuormat siirtyvät pylvaille ja perustuksille, joiden pääasiallinen tehtävä on kannatella johtimia. Sekä johtimet että niiden osat mitoitetaan kukin suurimman rasituksen aiheuttamalle kuormitustapaukselle (ks. taulukko 4.3).

Rakenteiden mitoitus noudattelee materiaalista (betoni, teräs, puu) riippuen eurokoodin osia 2, 3 tai 5. Erilaisia kuormitusyhdistelmiä tulee huomattava määrä, joten laskenta suoritetaan käytännössä tietokoneavusteisesti.

Pylväsrakenteen tyyppi vaikuttaa olennaisesti suunnitteluun ja suurimmalle osalle pylväistä on kehitetty oma mitoitusohjelma. Käytännön suunnittelussa tavanomaisia kannatinpylväitä ei välttämättä tarvitse mitoittaa ollenkaan, sillä ne ovat pääosin standardisoituja tyyppirakenteita. Usein vain tärkeimmät ja kriittisimmissä kohdissa olevat pylvää mitoitetaan yksityiskohtaisesti. Näitä ovat erityisesti kulma- ja kiristyspylväät, joihin kohdistuu suurimmat rasitukset.

Jotain osviittaa pylvaille tulevasta johdinkuormista voidaan antaa pienen laskentaesimerkin avulla. Oletetaan 400 kV voimajohto, jonka jänneväli on 400 metriä ja johdintyyppi Finch. Johtimia kulkee kolmessa tasossa, kaksi rinnan. Lisäksi käytössä on nippujohtimet, joissa on kolme osajohdinta (45 cm etäisyydellä toisistaan). Lisäksi tiedetään, että Finch-johdin painaa 2123 kg/km (Prysmian [12.5.2014]). Tällöin yhdelle pylvälle tulee pelkästään ilmajohtojen omasta painosta johtuen noin 150 kN kuorma.

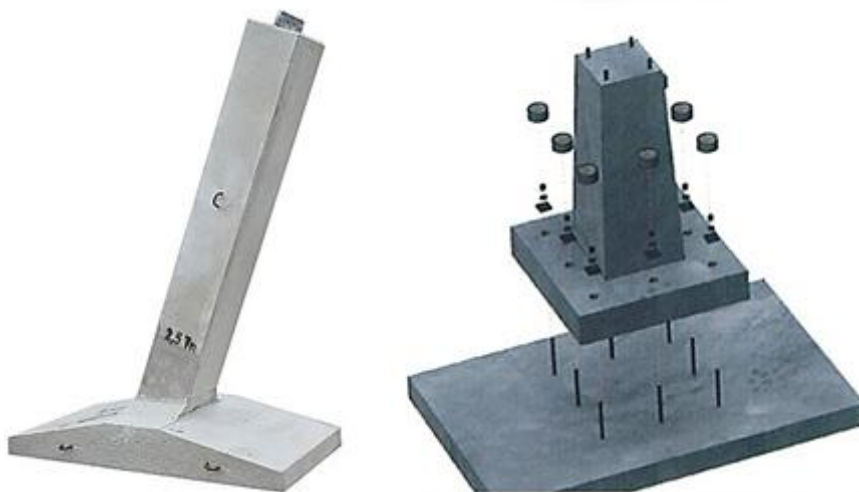
Johtojen tukirakenteet ovat tärkeä osa voimajohtorakennetta, mutta suurimmat rasitukset ja ongelmat aiheutuvat johdoista. CENELEC-standardien myötä kehityksen suuntana on ollut, että voimajohdon heikoin osa olisi eristin tai johdin, ei itse pylvä (Elovaara & Haarla 2011b, s. 252). Johdot kestävät hyvin pystysuuntaista kuormaa, mutta samanaikaisesti ne voivat olla alttiita epätavanomaisille rasituksille ja yllättäville ilmiöille (ASCE 2010, s. 2).

Johtoihin saattaa kohdistua dynaamisia kuormia, jotka aiheutuvat tuulesta, johdinten liikkeestä tai (lähinnä ulkomailla) maanjäristyksistä. Nämä voimat saattavat saada johdon tai koko rakenteen värähtelemään. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että näitä ilmiöitä ei juuri esiinny tai ne ovat vaikutuksiltaan olleet vähäisiä. Tyypillinen värähtelyn aiheuttaja on tuuli, joka saattaa aiheuttaa rakenneosan tai pulttien väsymismurtumisen tai pulttiliitosten löystymisen. (ASCE 2010, s. 67)

Tuuli voi aiheuttaa johtoon ainakin kahdenlaista värähtelyä. Pahimmat värähtelyt syntyvät, kun tuuli puhalttaa avoimessa maastossa tasaisella nopeudella 0,5-5 m/s kohtisuoraan johtoja vasten. Tämä saa johdot värähtelemään pystysuunnassa, mikä saattaa aiheuttaa väsymismurtumia. Toisessa tapauksessa tuulen, jään ja otollisten olosuhteiden muodostama yhteisvaikutus saattaa aiheuttaa voimakasta (pääosin) pystysuuntaista värähtelyä, jossa värähtelyn amplitudi voi olla lähes yhtä suuri kuin johdon riippuma. Ilmiö voi syntyä, kun johdin on epäsymmetrisesti peittynyt jäältä ja siihen puhalttaa kova 6-25 m/s tuuli. Tätä ilmiötä kutsutaan johtimien tanssiksi. Sen vaikutuksesta johtimet voivat lyödä yhteen aiheuttaen maa- tai oikosulkuvoiman, mikä taas saattaa aiheuttaa johdinvaurioita tai jopa pylväiden ylikuormituksen. Riski on olemassa erityisesti voimajohdoille, joissa kulkee päällekkäisiä johtoja. Värähtelyn syntyä pyritään estämään vä-

rähtelyvaimentimilla ja johtojen välisten eristimien käytöllä. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 284-285) Johtimia ei pidä myöskään asentaa liian kireälle, sillä se altistaa ne värähtelylle.

Pylväiden perustukset suunnitellaan standardin SFS-EN 1997-1 mukaan. Lisäksi standardi SFS-EN 50341-1 täydentää sitä ilmajohtojen perustuksiin liittyvillä yksityiskohdilla. Pylväiden perustukset riippuvat pylvästyypistä, ja tarkemmin siitä onko pylväs harustettu tai vapaasti seisova. Pylvääseen kohdistuvat rasitukset luonnollisesti myös vaikuttavat. Perustukset voidaan toteuttaa joko yhtenäisenä laattana tai kullekin jalalle asennettavina elementteinä. Elementtejä voidaan käyttää sekä keski- että suurjänniteverkon pylväiden perustuksissa. Harustetuille pylväille käytetään pääsääntöisesti aina elementtejä, mutta myös vapaasti seisovat pylväät voidaan toteuttaa elementtiperusteisina. Kuva 6.6 esittää kahdelle erityyppiselle pylväälle tarkoitettua elementtiä.



Kuva 6.6. Vasemmalla tyypillinen harustetun pylvään elementtiperustus. Oikealla suuren vapaasti seisovan pylvään elementtiperustukset. (Rudus [28.3.2014]; Fingrid 2014, s. 7)

Kuvan vasemmanpuoleisia elementtejä käytetään tyypillisesti 110 kV voimajohtojen perustuksissa. Niitä tulee kaksi kappaletta per pylväs. Elementin korkeus on 2100...2800 mm, leveys, 1600...2200 mm ja pituus 1000 mm (Rudus [28.3.2014]). Tämän lisäksi harustukset ankkuroidaan erillisillä elementeillä, jotka ovat paljon pienempiä.

Kuvan oikeanpuoleiset elementit ovat niin sanotun peltopylvään elementtejä. Pylväs seisoo neljällä jalallaan kahdesta toisiinsa liitettävästä elementistä ja kukin jalka koostuu kahdesta betonielementistä. Yksi elementti painaa 3 tonnia, eli yhteensä 24 tonnia per pylväs. Elementit kiinnitetään toisiinsa ankkuripulteilla. (Fingrid 2014, s. 7)

Usein suurten vapasti seisovien pylväiden perustukset rakennetaan kuitenkin paikallavalettuina laattoina. Kuva 6.7 esittää 400 kV voimajohdon paikallavaluperustuksia, jotka ovat huomattavasti suurempia kuin pienempijännitteisten ja/tai harustettujen pylväiden perustukset.



Kuva 6.7 400 kV voimajohdon pylvään paalutettu laattaperustus työn alla. (Uunila 2014)

Voimajohtojen pylväät suunnitellaan usein pitkille aikaväleille, varsinkin kantaverkossa. Pylvään ja perustusten luotettavuustason tulee tällöin olla korkea. Esimerkiksi Yhdysvalloissa voimajohtojen perustukset suunnitellaan usein konservatiivisten arvojen mukaan, jotta ne olisivat aina varmemmalla puolella johtoihin verrattuna (ASCE 2010, s. 2).

7 KUORMITUKSET

Tässä luvussa esitetään sähköasemilla vaikuttavat mekaaniset kuormat. Myös kuormien yhdistelyyn on otettu kantaa. Kuormat ovat määritelty standardissa SFS 6001, mutta niiden laskentaa standardi ei tarkemmin käsittele. Tämän luvun tarkoituksena on esittää, miten kyseiset kuormat voidaan laskennallisesti määrittää ja yhdistellä keskenään. Tässä esitetty laskenta perustuu pääosin standardeihin, mutta myös eri julkaisuihin ja esitteisiin. Laskentaesimerkkejä oikosulkuvoimien ja johdinten aiheuttamista kuormista on esitetty liitteissä 4 (tuuli- ja jääkuorma), 5 ja 6 (oikosulkuvoimat).

7.1 Kuormien yhdistely

Kuormien yhdistelyn tarkoituksena on ottaa huomioon kaikki mahdolliset kuormitusyhdistelmät ja selvittää niistä epäedullisin tapaus. Luvussa 4 esitettiin sähköasemastandardin SFS 6001 määrittelemät kuormitustapaukset ja niissä huomioon otettavat kuormat. Kuormitusyhdistelmiä määritettäessä huomioidaan siis kaksi kuormitustapausta: *normaali kuormitus* ja *poikkeuksellinen kuormitus*. Nämä muodostavat useita kuormitusyhdistelmiä, jotka on esitetty taulukossa 7.1.

Taulukko 7.1 Sähköaseman kuormien kuormitusyhdistelmät (KY). Sinisellä pohjalla on esitetty normaalit kuormitustapaukset ja punaisella pohjalla poikkeukselliset kuormitustapaukset.

Kuorma	KY1	KY2	KY3	KY4	KY5	KY6	KY7	KY8	KY9	KY10	KY11
Omapaino	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Vetokuorma		x		x	x		x	x	x	x	x
Asennuskuorma			x								
Jääkuorma				x		x		x			
Tuulikuorma					x	x	x				
KytKentävoimat									x		
Oikosulkuvoimat										x	
Johtimen katkeamiset											x

Taulukossa on esitetty tyypilliset kuormitusyhdistelmät, jotka on otettava tarkasteluun mukaan. Esitetyt yhdistelmät eivät kuitenkaan ole kattava lista, vaan eri yhdistelmät tulee tarkastella tapauskohtaisesti. Tarpeen tullen kuormitusyhdistelmiä lisätään ja/tai poistetaan.

Kuormien yhdistely lasketaan standardin SFS-EN 1990 esitettyjen rajatilojen mukaan. Tässä tarkastellaan murto- ja käyttörajatilaa, joiden laskenta on esitetty kaavoissa 7.1 ja 7.2 edellä mainitussa järjestyksessä (RIL 2011, s. 38 ja 41).

$$\left. \begin{matrix} 1,15K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad 7.1a$$

kuitenkin vähintään

$$\left. \begin{matrix} 1,35K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \quad 7.1b$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad 7.2$$

joissa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- K_{FI} = kuormakerroin seuraamusluokan mukaan
- $G_{k,j}$ = epäedullisen vaikutuksen aiheuttamat pysyvät ominaiskuormat kerrottuna kertoimella 1,15 K_{FI} tai edullisen vaikutuksen aiheuttavat pysyvät ominaiskuormat kerrottuna kertoimella 0,9
- P = esijännitysvoima kerrottuna osavarmuusluvulla γ_P
- $Q_{k,1}$ = määräävä muuttuva ominaiskuorma kerrottuna kertoimella 1,5 K_{FI}
- $Q_{k,j}$ = muiden samanaikaisten muuttuvien ominaiskuormien yhdistelyarvot ($\Psi_{0,i} Q_{k,i}$) kerrottuna kertoimella 1,5 K_{FI} .

Näistä kuormakertoimen K_{FI} valintaa käsiteltiin aiemmin luvussa 4. Esijännitysvoima P liittyy jännitettyihin betonirakenteisiin, joita ulkokytkeilaitoksilla ei esiinny. Omapaino $G_{k,j}$ on rakenteen tai rakennuksen omapaino, esimerkiksi jännitemuuntajaa kannatteleva teräspilari. Muuttuvia kuormia Q_k ovat kaikki muut kuormat rakenteen omaa painoa lukuun ottamatta, kuten jääkuorma ja kytkentävoimat. Standardi SFS-EN 1990 määrittää kuormitusyhdistelmien yhdistelykertoimet, joita käytetään kun samanaikaisesti esiintyy useampi kuin yksi muuttuva kuorma. Standardin oletuksena on, että muuttuvat kuormat eivät koskaan vaikuta täysimääräisinä samanaikaisesti. Ongelmana on, että ne on laadittu rakennuksen muuttuvia kuormia silmällä pitäen, mikä tekee niiden soveltamisen sähköaseman kuormiin käytännössä mahdottomaksi (ks. taulukko 7.2)

Taulukko 7.2 Kertoimien $\Psi_{0,i}$ arvot rakennuksille. (SFS NA EN 1990, s. 2)

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) ^{*)} kun $s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{**)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. ^{**)} Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.			

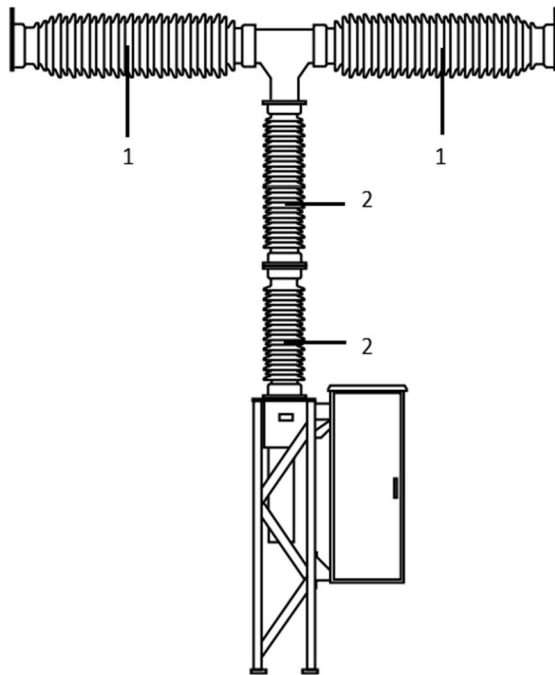
Kuten taulukosta 7.2 nähdään, niin siinä esitetyistä rakennuksen kuormista riippuvista yhdistelykertoimista ei ole mitään hyötyä ulkokytkinlaitosta suunniteltaessa. Esimerkiksi kytkentä- ja oikosulkuvoimille ei esitetä missään niille käytettävää yhdistelykerrointa. Lisäksi asuin- ja toimistorakennuksissa on tyypillisesti useita kerroksia, jolloin muuttuvien kuormien yhdistelykertoimilla on merkittävä vaikutus. Sähköasemilla toisaalta ei esiinny monia samanaikaisia muuttuvia kuormia, enintään kaksi, jos laskenta tehdään taulukon 7.1 mukaan. Tässä työssä suositellaankin käytettäväksi muuttuvan kuorman yhdistelykertoimena Ψ arvoa 1,0.

7.2 Tuulikuorma

Tuulikuorma otetaan huomioon ulkokytkinlaitosten kaikille komponenteille, joilla tässä tarkoitetaan johtimia, eristimiä ja tukirakenteita. Tuulikuorman suuruus riippuu tuulen nopeudesta ja rakenteen tai rakenneosan pinnanmuodosta. Tuulennopeus voidaan määrittää standardin SFS-EN 1991-1-4 mukaan, mutta ulkokytkinlaitosten komponenttien pinnanmuotojen määrittämiseen se ei ole täysin kattava.

Komponenttien muodoista voidaan yleisesti todeta, että johtimet ovat ohuita ja poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisia, eristimien ulkopinta on aaltoileva, tukiraken-

teet ovat putkia tai ristikoita. Tuulikuormaa määritettäessä voidaan olettaa, että ulkokyt-
kinlaitoksen kaikki osat voidaan lukea johonkin näistä kolmesta komponenteista. Teräk-
siset tukirakenteet, eli pylväät tai ristikot, on helppo tunnistaa. Samoin ovat johtimet.
Eristimet sen sijaan ovat hankalampi erottaa, sillä osa laitteista muistuttaa ulkonaisesti
eristimiä, vaikka toiminnaltaan niitä ei eristimiksi luetakaan. Tästä huolimatta kaikki
eristimiltä näyttävät osat voidaan olettaa eristimiksi tuulikuormaa määritettäessä, koska
vain komponenttien ulkomuoto ratkaisee. Tätä havainnollistaa kuvan 7.1 katkaisija.



Kuva 7.1 Live-tank-katkaisija, jossa on katkaisupäät (1) ja tukieristimet (2). (ABB [vii-
tattu 2.5.2014])

Kuvan katkaisija koostuu useista eri osista, joista erikseen on nimetty vain katkaisupäät
ja tukieristimet. Ne ovat samaa materiaalia, sisältävät SF_6 -kaasua ja muistuttavat ulkoi-
sesti hyvin paljon toisiaan. Katkaisupäässä kuitenkin vaikuttaa suurjännitteen määräämä
potentiaali ja se sisältää virtapiirin katkaisuun liittyvät toiminnot (valokaari-ilmiö). Tu-
kieristimet ovat puolestaan onttoja ja niiden tehtävänä on eristää suurjänniteosat ja kat-
kaisupäät maanpinnasta. Tuulikuormaa määritettäessä tämä kaikki on kuitenkin toissi-
jaista, sillä ainoastaan pinnanmuoto ratkaisee.

Kaikkien komponenttien tuulikuormaa määritettäessä laskenta etenee siten, että
määritetään tuulenpaine ja kunkin komponentin pinnanmuoto. Tuulenpaine on sama
kaikille komponenteille ja voidaan määrittää standardista SFS-EN 1991-1-4. Kompo-
nenttien pinnanmuotoihin sovelletaan samaa standardia tukirakenteiden (pylväät ja risti-
kot) osalta, mutta johtimille ja eristimille sovelletaan standardia SFS-EN 50341-1, kos-
ka siinä on esitetty ilmajohtojen ja eristimien tuulikuorman laskenta.

7.2.1 Tuulenpaine EC 1991-1-4 mukaan

Tuulennopeuden perusarvo v_b lasketaan kaavasta 7.3 (SFS-EN 1991-1-4, s. 30).

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}$$

7.3

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- c_{dir} = suuntakerroin, jonka suositusarvo on 1,0
- c_{season} = vuodenaikakerroin, jonka suositusarvo on 1,0
- $v_{b,0}$ = tuulennopeuden modifioimaton perusarvo.

Suomen kansallinen liite antaa tuulennopeuden modifioimattomalle perusarvolle taulukon 7.3 mukaisia arvoja.

Taulukko 7.3 Tuulennopeuden modifioimattomat perusarvot Suomessa. (SFS NA EN 1991-1-4, s. 2)

Manneralueet koko maassa	$v_{b,0} = 21 \text{ m/s}$
Merialueet: avomeri, harva ulkosaaristo	$v_{b,0} = 22 \text{ m/s}$
Tunturien lakialueet	$v_{b,0} = 26 \text{ m/s}$
Alamaastossa tunturien juurella	$v_{b,0} = 21 \text{ m/s}$

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo v_m riippuu korkeudesta maanpinnan yläpuolella, maaston rosoisuudesta ja pinnanmuodostuksesta, jolle voidaan käyttää arvoa 1,0. Näin riittää enää määrittää rosoisuuskertoimen.

Maastokerroin k_r voidaan laskea kaavasta 7.4 käyttäen taulukon 7.4 arvoja (SFS-EN 1991-1-4, s. 32-33).

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad 7.4$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- z_0 = maastoluokasta riippuva kerroin (ks. taulukko 7.2)
- $z_{0,II} = 0,05 \text{ m}$ (maastoluokka II, vertailuarvo).

Taulukko 7.4 Maastoluokat ja maastoparametrit. (SFS-EN 1991-1-4, s. 34)

Maastoluokka	z_0 m	z_{min} m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10

Maastoluokan 0 kohdalla laskentaa sovelletaan kuitenkin niin, että maastokertoimelle k_r sovelletaan merialueilla arvoa 0,18 kaavan 7.4 antaman tuloksen sijaan (SFS NA EN 1991-1-4, s. 2).

Rosoisuuskertoimen c_r saadaan määritettyä nyt kaavasta 7.5 (SFS-EN 1991-1-4, s. 32).

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{kun } z_{\min} \leq z < z_{\max} \quad 7.5a$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{kun } z \leq z_{\min} \quad 7.5b$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- z = rakenteen korkeus
- z_0 = rosoisuusmitta (ks. taulukko 7.4)
- k_r = maastokerroin.

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo $v_m(z)$ korkeudella z maanpinnasta voidaan laskea nyt kaavasta 7.6 (SFS-EN 1991-1-4, s. 32).

$$v_m(z) = c_r(z)c_o(z)v_b \quad 7.6$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- $c_r(z)$ = maaston rosoisuuskertoimen
- $c_o(z)$ = maaston pinnanmuotokerroin, jolle käytetään arvoa 1,0
- v_b = tuulennopeuden perusarvo.

Sähköasemastandardi SFS 6001 määrittää, että tuulennopeus on enintään 34 m/s (SFS 6001, s.32). Tässä oletetaan, että kyseinen arvo vastaa edellä määritettyä eurokoodin modifioitua perusarvoa $v_m(z)$, joka ei siis voi ylittää arvoa 34 m/s.

Seuraavaksi määritetään tuulenpuuskien intensiteetti $I_v(z)$ korkeudella z maanpinnasta, jota tarvitaan puuskanopeuspaineen määrittämiseen. Tuuli aiheuttaa pyörteitä ja sen turbulenssin keskihajonta σ_v voidaan laskea kaavalla 7.7 (SFS-EN 1991-1-4, s. 36).

$$\sigma_v = k_r v_b k_l \quad 7.7$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- k_r = maastokerroin (ks. kaava 7.4)
- v_b = tuulennopeuden perusarvo (ks. kaava 7.3)
- k_l = pyörteisyyskerroin, jonka suositusarvo on 1,0.

Tuulenpuuskien intensiteetti $I_v(z)$ voidaan määrittää nyt kaavasta 7.8 (SFS-EN 1991-1-4, s. 36).

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} \quad \text{kun } z_{\min} \leq z < z_{\max} \quad 7.8a$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{kun } z \leq z_{\min} \quad 7.8b$$

jossa tuulen turbulenssin keskihajonta σ_v ja tuulennopeuden modifioitu perusarvo $v_m(z)$ ovat esitetty edellä.

Lopulta voidaan laskea korkeudella z vallitseva puuskanopeuspaine $q_p(z)$ kaavasta 7.9 (SFS-EN 1991-1-4, s. 38). Tätä puuskanopeuspainetta käytetään kaikkien ulkokyt-kinlaitoksen komponenttien (ks. luvut 7.2.2...7.2.5) tuulikuormien määrittämiseen.

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho_a v_m^2(z) \quad 7.9$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

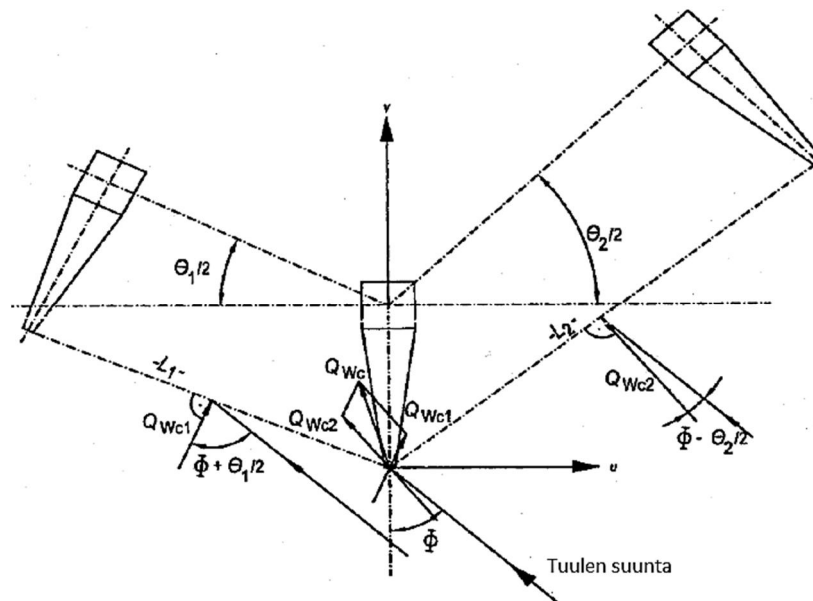
- $I_v(z)$ = tuulenpuuskien intensiteetti
- ρ_a = ilman tiheys, jonka suositusarvo on $1,25 \text{ kg/m}^3$
- $v_m(z)$ = tuulennopeuden modifioitu perusarvo.

7.2.2 Johtimien tuulikuorma

Johtimiin kohdistuu tuulenpaine, joka aiheuttaa johtoa vasten kohtisuoran voiman. Yleinen lauseke kahden vierekkäisen jätteen pylväälle aiheuttamasta tuulikuormasta lasketaan kaavalla 7.10 (SFS-EN 50341-1, s. 52).

$$Q_{wc} = q_p(z) G_c C_c d_c \left[\pm \frac{L_1}{2} \cos^2 \left(\phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \cos \left(\frac{\theta_1}{2} \right) + \frac{L_2}{2} \cos^2 \left(\phi + \frac{\theta_2}{2} \right) \cos \left(\frac{\theta_2}{2} \right) \right] \quad 7.10$$

Voimajohtojen johtimet voivat muodostaa johtokulman, kuten kulmapylväiden tapauksessa (ks. kuva 7.2). Ulkokytkinlaitoksilla johtimet sijoitetaan kuitenkin aina suoraksi linjaksi. Lisäksi tuulen voidaan aina olettaa vaikuttavan kohtisuorasti johtimia vasten.



Kuva 7.2 Johtimien tuulikuormat, yleinen tapaus. (SFS-EN 50341-1, s. 53)

Ulkokytkinlaitoksen kohdalla voidaan merkitä:

- $\emptyset = 0$
- $\theta_1, \theta_2 = 0$.

jolloin kaava 7.10 yksinkertaistuu muotoon:

$$Q_{wc} = q_p(z) G_c C_c d_c \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \quad 7.11$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- $q_p(z)$ = puuskanopeuspaine
- G_c = johtimen rakenteellinen kerroin (=jännekerroin)
- C_c = johtimen vastuskerroin (=muotokerroin)
- d_c = johtimen halkaisija
- L_1 ja L_2 = vierekkäisten jänneväljen mitat.

Vastuskerroin voidaan standardin (SFS-EN 50341-1) mukaan määrittää kolmella eri menetelmällä. Näistä menetelmä 1 perustuu eurooppalaisiin standardeihin tai kansallisiin liitteisiin ja sen mukaan vastuskerroin C_c on 1,0 yleisesti käytetyille monisäikeisille johtimille ja tuulennopeuksille (SFS-EN 50341-1, s. 56). Vaikka kiskot eivät ole monisäikeisiä, on tässä työssä päädytty käyttämään tätä arvoa laskennan yksinkertaistamiseksi. Vastuskertoimen määrittäminen menetelmällä 2 perustuu tuulitunnelikokeisiin ja menetelmä 3 standardissa EN 1993-3-1 esitettyyn laskentaan, joka huomioi Reynoldsin luvun. Näin ollen johtimen tuulikuorman määrittämiseen riittää laskea johtimen rakenteellinen kerroin G_c , joka lasketaan kaavasta 7.12 (SFS-EN 50341-1, s. 54).

$$G_c = \frac{1 + 2k_p I_v(z) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z)} \quad 7.12$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- k_p = huippukerroin, jonka suositeltava arvo on 3,0
- $I_v(z)$ = tuulenpuuskien intensiteetti (ks. kaava 7.8)
- B^2 = taustakerroin
- R^2 = resonanssivastekerroin, jonka suositeltava arvo on 0.

Huippukerroin määritellään vasteen vaihtelevan osan maksimiarvon ja sen keskihajonnan välisenä suhteena. Taustakerroin ottaa huomioon täyden korrelaation puuttumisen vaikutuksen tuulenpaineessa ja resonanssivastekerroin turbulenssin värähtelymuotoon liittyvässä resonanssissa. Taustakerroin lasketaan kaavasta 7.13.

$$B^2 = \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \frac{L_m}{L(z)}} \quad 7.13$$

jossa L_m on kahden vierekkäisen jänteen (L_1 ja L_2) keskipituus ja $L(z)$ on turbulenssin pituusskaala johtimien vertailukorkeudella z , joka lasketaan kaavasta 7.14. Varmalla puolella oleva valinta on käyttää taustakertoimelle B^2 arvoa 1,0. (SFS-EN 1991-1-4, s. 184)

$$L(z) = 300 \left(\frac{z}{200} \right)^{0,67+0,05 \ln(z_0)} \quad 7.14$$

jossa z on johtimien korkeus maanpinnasta ja z_0 rosoisuusmitta (ks. taulukko 7.4).

7.2.3 Eristimien tuulikuorma

Eristimiin vaikuttaa niihin itseensä kohdistuva tuulenpaine ja lisäksi johtimilta tuleva tuulikuorma, joka laskettiin jo edellä. Eristimiin kohdistuva tuulikuorma määritetään kaavasta 7.15 (SFS-EN 50341-1, s. 56)

$$Q_{Wins} = q_p(z) G_{ins} C_{ins} A_{ins} \quad 7.15$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- $q_p(z)$ = puuskanopeuspaine (ks. kaava 7.9)
- z = eristimelle käytettävä maanpinnasta mitattu korkeus, joka on kiinnityspisteen korkeus pylväässä
- G_{ins} = eristimen rakenteellinen kerroin, jonka suositeltava arvo on 1,0
- C_{ins} = eristimen vastuskerroin, jonka suositeltava arvo on 1,2
- A_{ins} = eristimen vaakasuoraan projisoitu pinta-ala ketjun akselin suuntaisessa pystytasossa (usein kuorma halutaan viivakuormana, jolloin kaavaan syötetään vain eristimen vaakamitta).

Standardi SFS-EN 50341-1 ottaa huomioon eristimen heilahduskulman, koska voimajohtojen eristeet ovat nivelellisiä, toisin kuin ulkokytkinlaitosten jäykät tukieristimet. Eristimen pinta-ala saadaan siten kaavasta 7.16.

$$A_{ins} = L_{ins} D_{ins} \quad 7.16$$

jossa L_{ins} on eristimen tehollinen pituus ja D_{ins} eristimen ulkohalkaisija.

7.2.4 Putkipylväiden tuulikuorma

Putkipylväät ovat tukirakenteita, jotka kantavat eristeet ja johtimet. Ne ovat ulkokytkinlaitoksilla eniten käytetyimpiä tukirakenteita. Putkipylväisiin vaikuttaa niihin itseensä kohdistuva tuulenpaine sekä eristimien ja johtimien tuulikuormat. Pylvään oma tuulikuorma määritetään kaavasta 7.17 (SFS-EN 50341-1, s. 60).

$$Q_{Wpol} = q_p(z) G_{pol} C_{pol} A_{pol} \quad 7.17$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- $q_p(z)$ = puuskanopeuspaine (ks. kaava 7.9)
- z = pylvään korkeus maanpinnasta mitattuna
- G_{pol} = pylvään rakenteellinen kerroin, jonka suositusarvo on 1,0
- C_{pol} = pylvään vastuskerroin
- A_{pol} = pylvään tai pylvään osan projektiopinta-ala kohtisuoraan tuulen suuntaa vastaan olevassa pystytasossa (usein kuorma halutaan viivakuormana, jolloin kaavaan syötetään vain pylvään vaakamitta).

Pylvään korkeutena käytetään standardissa (SFS-EN 50341-1) niin sanottua vertailukorkeutta, joka voidaan määrittää kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä menetelmässä pylväs jaetaan osiin ja kunkin tarkasteltavan osan vertailukorkeus on sen geometriseen keskipisteeseen maan pinnasta mitattu korkeus. Toinen menetelmä käsittelee pylvästä pystysuorana rakenteena ja käyttää vertailukorkeutena tiettyä prosenttiosuutta, suositusarvona 60 %. Ulkokytkinlaitosten pylväävät ovat kuitenkin verrattain yksinkertaisempia ja matalampia kuin voimajohtojen, joten tässä on päädytty käyttämään putken todellista korkeutta z .

Pylvään vastuskerroin C_{pol} voidaan valita taulukosta 7.5, johon on sisällytetty erilaisia teräspylväitä.

Taulukko 7.5 *Teräspylväiden vastuskertoimia erilaisille poikkileikkauksille. Kursivoidut arvot ovat useimmiten käytettyjä profiileja. (SFS-EN 50341-1, s. 60)*

<i>Kulmikas poikkileikkaus</i>	$C_{pol} = 1,8$
6-kulmainen poikkileikkaus	$C_{pol} = 1,4$
8- tai 10-kulmainen poikkileikkaus	$C_{pol} = 1,2$
12-kulmainen poikkileikkaus	$C_{pol} = 1,0$
16-kulmainen poikkileikkaus	$C_{pol} = 0,7$
<i>Pyöreä poikkileikkaus</i>	$C_{pol} = 0,7$

7.2.5 Ristikkopylväiden tuulikuorma

Ristikkopylväät toimivat tukirakenteina aivan kuten putkipylväätkin. Niihin vaikuttaa siten myös samat kuormat. Poikkeuksena on rakenteeseen itseensä vaikuttava tuulikuorma, joka ristikolle määritetään eri tavalla kuin putkelle. Ristikot ovat melko harvinaisia ulkokytkinlaitoksilla, sillä suurin osa laitteista ja johtimista tuetaan putkilla. Mikäli ristikoita käytetään joidenkin laitteiden kannattamiseen, ovat ne usein vakioituja ratkaisuita, jotka laitevalmistaja on optimoinut. Tästä huolimatta ristikon tuulikuorman määrittäminen esitetään, vaikka ne harvinaisempia rakenteita ovatkin.

Ristikkorakenteen tuulikuorma F_w määritetään kaavasta 7.18 (SFS-EN 50341-1, s. 42).

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(z) A_{ref} \quad 7.18$$

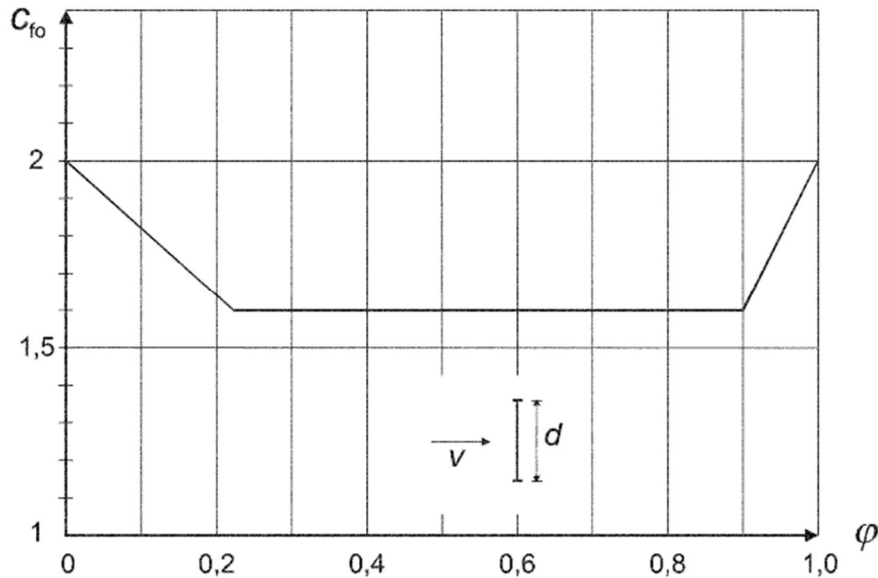
jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- $c_s c_d$ = rakennekerroin, jolle voidaan käyttää arvoa 1, kun rakenne on alle 15 m
- c_f = rakenneosan voimakerroin
- $q_p(z)$ = puuskanopeuspaine (ks. kaava 7.9)
- A_{ref} = rakenteen tai rakenneosan tuulenpaineen vaikutusala.

Voimakerroin ristikkorakenteelle saadaan kaavasta 7.19 (SFS-EN 50341-1, s. 128).

$$c_f = c_{f,0} \Psi_\lambda \quad 7.19$$

jossa $c_{f,0}$ on ristikkorakenteiden voimakerroin ilman päätevaikutuksia ja Ψ_λ päätevaikutuserroin. Voimakerroin määritetään kuvasta 7.3.



Kuva 7.3 Voimakerron tasoristikkorakenteelle eheyssuhteen φ funktiona. (SFS-EN 1991-1-4, s. 130)

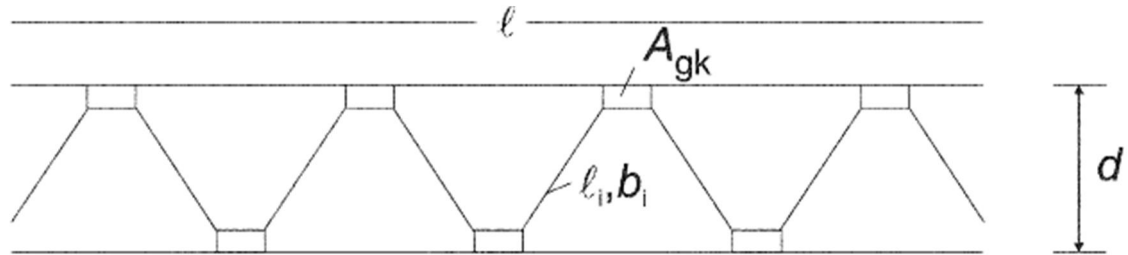
Eheyssuhde φ määritetään kaavasta 7.20.

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad 7.20$$

jossa A on tarkasteltavalle sivulle projisoidun sivun sauvojen ja nurkkalevyjen projektio-pinta-alojen summa (kaava 7.21) ja A_c on sivulle, jonka mitat ovat $d \times l$, projisoidun sivun ulkoreunojen pinta-ala (ks. kuva 7.4).

$$A = \sum_i b_i l_i + \sum_k A_{gk} \quad 7.21$$

jossa $b_i \times l_i$ yksittäisen sauvan i leveys ja pituus sekä A_{gk} nurkkalevyn k pinta-ala (ks. kuva 7.4).



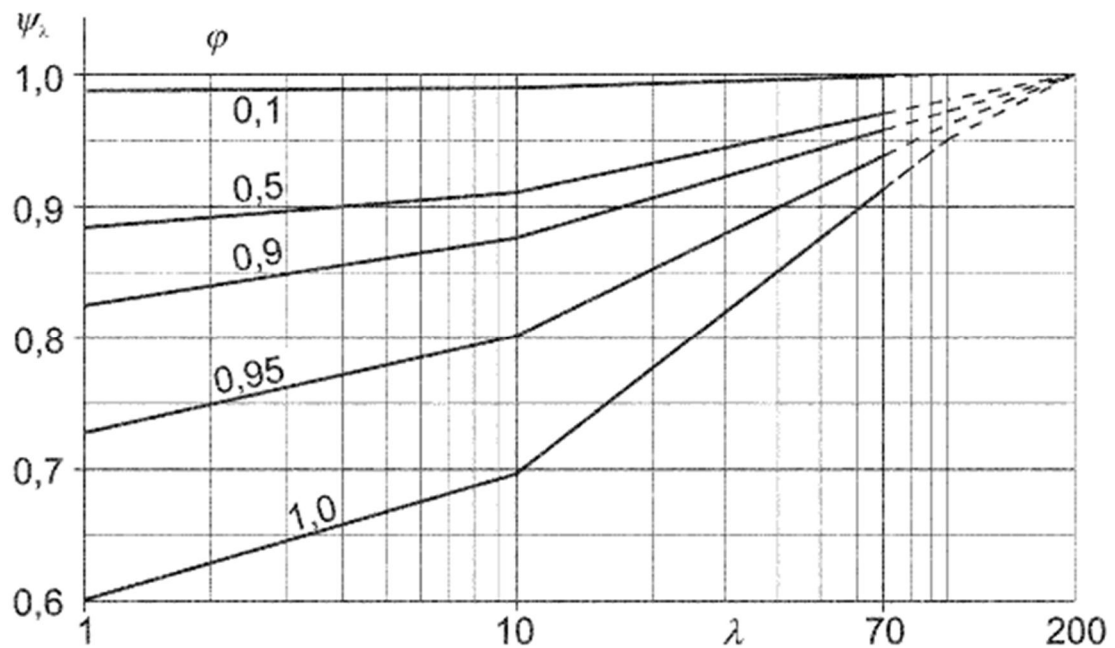
Kuva 7.4 Ristikkorakenne mittoineen. (SFS-EN 1991-1-4, s. 130)

Tuulikuorman vaikutusala A_{ref} on yhtä kuin A . Nyt riittää enää määrittää päätevaikutuskerroin ψ_λ , joka määritetään tehollisen hoikkuuden λ funktiona. Tehollinen hoikkuus taas riippuu rakenteen mitoista ja sijainnista (ks. taulukko 7.6).

Taulukko 7.6 Tehollisen hoikkuuden λ suositusarvot. (SFS-EN 1991-1-4, s. 136)

No.	Rakenteen sijainti, tuuli kohtisuorassa kuvatasoa vastaan	Tehollinen hoikkuus λ
1		Monikulmio-, suorakaide- ja terävasärmäisille profiileille ja ristikkorakenteille: kun $l \geq 50$ m, $\lambda = 1,4 \cdot l/b$ tai $\lambda = 70$, sen mukaan, kumpi on pienempi
2 ²⁾		kun $l < 15$ m, $\lambda = 2 \cdot l/b$ tai $\lambda = 70$, sen mukaan, kumpi on pienempi Ympyräsyntereille: kun $l \geq 50$, $\lambda = 0,7 \cdot l/b$ tai $\lambda = 70$, sen mukaan, kumpi on pienempi
3		kun $l < 15$ m, $\lambda = l/b$ tai $\lambda = 70$, sen mukaan, kumpi on pienempi Pituuden l väliarvoilla käytetään lineaarista interpolointia.
4		kun $l \geq 50$ m, $\lambda = 0,7 \cdot l/b$ tai $\lambda = 70$, sen mukaan, kumpi on suurempi kun $l < 15$ m, $\lambda = l/b$ tai $\lambda = 70$, sen mukaan, kumpi on suurempi Pituuden l väliarvoilla käytetään lineaarista interpolointia.

Ristikoita koskee taulukon ylimmäinen rivi ja siitä saadun tehollisen hoikkuuden λ ja aikaisemmin määritetyn eheyssuhteen φ avulla voidaan kuvasta 7.5 määrittää pätevaikutuskertoimen Ψ_λ .

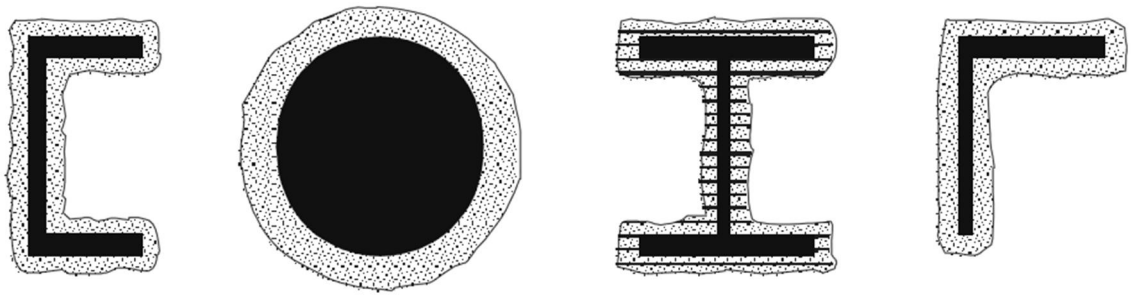


Kuva 7.5 Pätevaikutuskertoimen Ψ_λ suuntaa antavia arvoja. (SFS-EN 1991-1-4, s. 138)

7.3 Jääkuorma

Jääkuormaa harvoin huomioidaan rakenneosia suunniteltaessa, sillä rakenneosat sijaitsevat suojassa rakennuksen sisällä. Rakennukset taas mitoitetaan lumikuormalle eikä jättä oteta huomioon. Rakennuskohteita, joihin jääkuormaa sovelletaan, ovat erityisesti mastot ja ilmajohdot. Ulkokytkinlaitoksilla jääkuormat otetaan huomioon vain ilmajohdoille ja kiskoille, ei tukirakenteille eikä eristimille (SFS 6001, s. 30).

Jääkuorma vaikuttaa rakenteisiin kahdella tapaa. Kertyessään rakenneosan (tässä tapauksessa ilmajohdon) pinnalle kasvaa rakenteelle tuleva kuorma. Lisäksi jään paksuudesta johtuva pinta-alan kasvu lisää tuulipintaa, jolloin myös tuulikuorma kasvaa. Kuva 7.6 esittää jään paksuutta rakenneosissa. Ilmajohdot ja kokoojakiskot ovat poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisia. Näin ollen kuvan muut profiilit voidaan unohtaa ja samalla laskenta yksinkertaistuu.



Kuva 7.6 Jään paksuus rakenneosissa. (SFS-EN 1993-3-1, s. 52)

Eri standardeissa otetaan kantaa jääkuormaan ja siihen liittyviin parametreihin, kuten jään tiheyteen. Sähköasemien pääasiallinen soveltamisstandardi SFS 6001 (2014) määrittää jään tiheydelle arvon 900 kg/m^3 ja käytettäväksi jään paksuudeksi 1 mm, 10 mm tai 20 mm, jos paikallista kokemusta tai tilastoja ei ole käytettävissä (SFS 6001, s. 30).

Jääkerroksen määrä, jään tiheys ja muoto riippuvat voimakkaasti paikallisista ilmastoloosuhteista ja topografiasta sekä rakenteen muodosta. Ilmastollinen jäätyminen luokitellaan tavallisesti joko huurrejääksi tai jäätäväksi sateeksi, jään muodostumistavasta riippuen. Nämä voivat johtaa erityyppisiin jään olomuotoihin, joita ovat muun muassa märkä lumi, kirkas jää sekä pehmeä ja kova huurre. Olomuodon mukaan määräytyvät myös jäätyypin ominaisuudet, kuten tiheys, joka otetaan huomioon mitoituksessa. (SFS-EN 1993-3-1, s. 51)

Jääkuorma voidaan olettaa kertyvän rakenteen rakenneosien ympärille tasaisesti. Todellisuudessa jää kuitenkin muodostuu usein epäsymmetrisesti, mutta tällä ei ole merkittävää vaikutusta sähköaseman ilmajohdoille tai rakenteille. Epäsymmetrinen kuorma kannattaneen ottaa huomioon lähinnä korkeille ja suurille rakenteille, kuten mastoille sekä voimajohtojen pylväille.

Standardissa SFS-EN 50341-1 voimajohdoille määritellään jääkuorma sekä yhdistetty tuuli- ja jääkuorma. Siinä perusjääkuorma on määritelty vastaamaan tilannetta, jossa johtimen halkaisija on 30 mm, jänteen pituus 100 m ja korkeus 10 m maanpinnasta (SFS-EN 50341-1, s. 136). Ulkokytkinlaitoksen kokoojakiskoille vastaavat etäisyydet ovat luokkaa putken halkaisija 100 mm, jänteen pituus sekä korkeus maanpinnasta alle 10 m. Kyseessä on siis kaksi erityyppistä systeemiä, joita ei suoranaisesti voi verrata keskenään. Tässä työssä on päädytty siihen, että johtimien ja kiskojen jääkuorma voidaan laskea ilman standardia SFS-EN 50341-1. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että sähköasemastandardi SFS 6001 määrittää jään tiheydelle arvon 900 kg/m^3 , jolloin kansallisen liitteen antamaa vertailujääkuorman arvoa on kyseenalaista käyttää, koska siinä jään tiheys on lähes puolta pienempi 500 kg/m^3 (ks. taulukko 7.7). Lisäksi jääkuorman laskeminen ympyrän muotoisille johtimille on yksinkertaista ja saatu tulos on varsin tarkka.

Taulukko 7.7 Johtimien jääkuorma. (SFS-EN 50341-3-7, s. 18)

Jäätymislukka	Suhteellinen korkeus (m)	Vertailujääkuorma I_R (N/m)	Tiheys (kg/m ³)	Vastuskerroin	Jään tyyppi
I	0...50	10	500	1,15	huurre
II	50...100	25	500	1,15	huurre
III	100...200	50	500	1,15	huurre
IV	> 200	75	500	1,15	huurre

Standardista SFS-EN 50341-1 voidaan sen sijaan määrittää johtimen vastuskerroin, sillä tiheyden arvolle 900 kg/m³ on sitä vastaava kerroin (ks. taulukko 7.8).

Taulukko 7.8 Vastuskertoimet jäättyypin ja jään tiheyden mukaan. (SFS-EN 50341-1, s. 63)

Jäätyyppi	Märkä lumi	Kirkas jää	Pehmeä huurre	Kova huurre
C_{Ic}	1,0	1,0	1,2	1,1
ρ_I [kg/m ³]	500	900	300	700

Taulukon mukaan vastuskerroin G_{Ic} saa aina arvon 1,0. Standardin (SFS-EN 50341-1) esittämä jäätyneen johtimen ekvivalentti halkaisija on tässä esitetty arvo D_{tot} .

Tukirakenteille siirtyvä johdinten ja kiskojen ympärille kertyvä jääkuorma I pituusyksikköä kohden voidaan laskea kaavasta 7.22.

$$I = \rho_I A_I g \quad 7.22$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- ρ_I = jään tiheys, joka on 900 kg/m³
- A_I = rakennusosan ympärille kertyneen jään poikkipinta-ala
- g = putoamiskiihtyvyys, joka on 9,81 m/s².

Kertyneen jään pinta-ala A_I saadaan kaavoista 7.23 ja 7.24, kun oletuksena on ympyrän muotoinen profiili.

$$D_{tot} = d_c + 2d_I \quad 7.23$$

$$A_I = \frac{\pi}{4} (D_{tot}^2 - d_c^2) \quad 7.24$$

joissa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- d_c = johtimen halkaisija
- d_I = jään paksuus
- $D_{tot} = d_c + 2d_I$ = kiskon tai johtimen halkaisijan ja jään paksuuden summa.

Nyt voidaan laskea tukirakenteelle jäältä aiheutuva pystykuorma Q_I kaavasta 7.25.

$$Q_I = I \frac{(L_1 + L_2)}{2} \quad 7.25$$

jossa I on jääkuorma metriä kohden ja L_1 sekä L_2 vierekkäisten jänneväliden mitat.

7.4 Yhdistetty tuuli- ja jääkuorma

Jäätynneiden johtimien tuulikuorma lasketaan kaavasta 7.26. Tuuli vaikuttaa aina kohtisuorasti johtimeen, toisin kuin voimajohdoissa, jossa johdot eivät aina muodosta suoraa linjaa.

$$Q_{WIC} = q_p(z) G_c C_{Ic} D_{tot} \frac{L_1 + L_2}{2} \quad 7.26$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

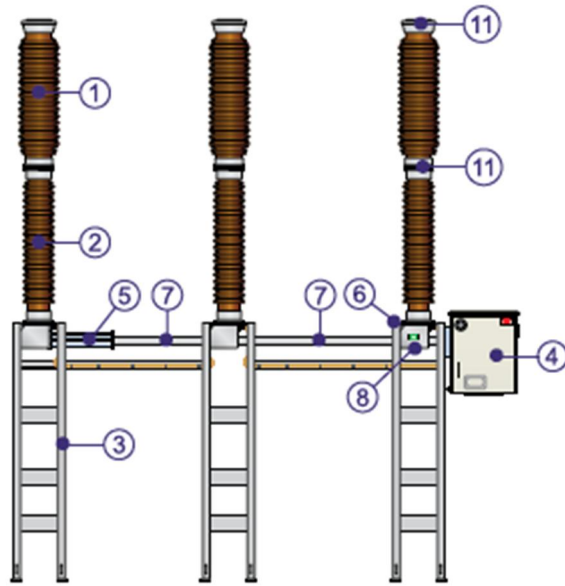
- $q_p(z)$ = puuskanopeuspaine (ks. kaava 7.9)
- G_c = johtimen jännekerroin (ks. kaava 7.12)
- C_{Ic} = jään peittämän johtimen vastuskerroin, joka on 1,0
- D_{tot} = jään peittämän johtimen paksuus (ks. kaava 7.23)
- L_1 ja L_2 = vierekkäisten jänneväliden mitat.

7.5 Kytkentävoimat

Kytkentävoimat ovat laitteissa tapahtuvien operaatioiden synnyttämiä mekaanisia voimia, jotka on otettava huomioon tukirakenteita suunniteltaessa. Vastuu voimien määrittämisestä on laitteen suunnittelijalla (SFS 6001, s. 31). Tässä ei ole tarkoituksena esittää laskentakaavoja voimien määrittämiseen, vaan kertoa mistä voimat syntyvät ja mitä suuruusluokkaa ne tyypillisesti ovat.

Kytkentävoimilla voidaan periaatteessa tarkoittaa mitä tahansa laitteiden aiheuttamia mekaanisia voimia. Tässä työssä tarkastellaan kuitenkin vain katkaisijoiden aiheuttamia voimia, koska ne voivat suuruusluokaltaan olla merkittäviä. Lisäksi tarkastelu rajataan vain suurjänniteverkon katkaisijoihin, jotka eroavat toiminnoiltaan ja rasituksiltaan pien- ja keskijänniteverkon katkaisijoista.

Katkaisijaan itseensä vaikuttaa luonnollisesti samat kuormat kuin muihinkin ulko-kytkinlaitoksen rakenteisiin. Kytkentävoimat vain tuovat lisäkuorman, joka muiden kuormien ohella on huomioitava. Tarkastellaan erään katkaisijan rakennetta kuvasta 7.7.

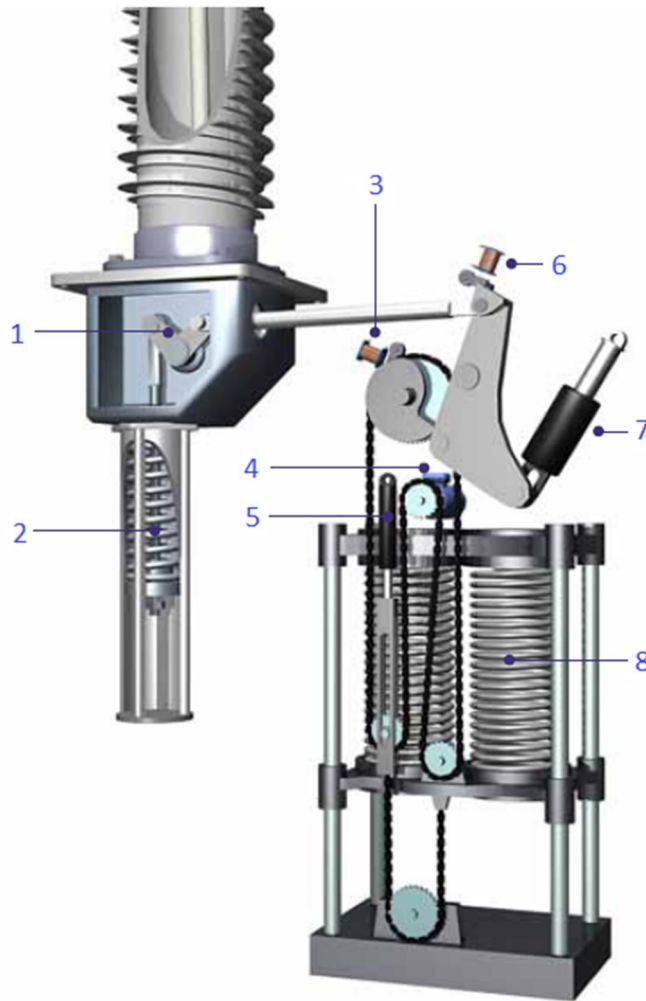


Kuva 7.7 LTB D katkaisija, joka toimii 170 kV jännitteeseen asti. Katkaisija on 3-vaiheinen ja siinä on yksi katkaisupää yhtä vaihetta kohden. Selite: 1) katkaisupää, 2) tukieristin, 3) tukirakenne, 4) ohjainlaatikko, 5) laukaisujousi, 6) kaasun seurantayksikkö, 7) ohjausvipu suojaputkineen 8) vaiheindikaattori, 11) johdinliittimet. (ABB [viitattu 2.5.2014], s. 13)

Kuvan katkaisija on kolminapainen ja siinä on yksi katkaisupää kutakin napaa kohden. Se muodostuu tukirakenteesta, eristimistä ja varsinaisista laiteosista. Katkaisijan rakenne ei ulkoisesti eroa mainittavasti muista ulkokytkinlaitoksen laitteista. Katkaisija on kuitenkin monimutkainen laite, johon liittyy useita teknisiä toimintoja. Sen tehtävä on sulkea ja avata virtapiirejä, mihin sen on kyettävä hyvinkin nopeasti. Tämä vaatii katkaisijalta seuraavat ominaisuudet (ABB [viitattu 2.5.2014], s. 26):

- energian lataaminen ja varastointi
- energian vapauttaminen
- energian siirtäminen
- ohjauslaitteiden toiminta.

Tähän on kehitelty erilaisia toimintaoperaatioita, joita ovat muun muassa hydraulisesti, motorisesti tai jousen avulla toimivat ohjauslaitteet. Näistä jälkimmäisin menetelmä on toimintavarmin, sillä se sisältää vähiten liikkuvia osia eikä kaasun tai öljyn vuotaminen aiheuta sen toiminnalle riskiä. Tämän vuoksi jousella toimivat ohjauslaitteet ovat suosittuja katkaisijoissa. Kuvassa 7.8 on eräs jousella toimiva ohjauslaite.



Kuva 7.8 Jousella toimiva ohjauslaite. Selite: 1) liittävä vaihde, 2) laukaisujousi, 3) lukitussalpa, 4) moottori, 5) sulkeutuva iskunvaimennin, 6) laukaisusalpa, 7) avaava iskunvaimennin, 9) sulkeutuvat jouset. (ABB [viitattu 2.5.2014], s. 28)

Ohjauslaite, oli se sitten jousella tai jollain muulla toimiva, sijaitsee katkaisijan ohjainlaatikossa. Käsitellään tässä kuitenkin jousella toimivaa ohjauslaitetta. Katkaisijan havaitessa ylivirran, se sulkee virtapiirin, jolloin jouseen varastoitunut energia laukeaa ja aiheuttaa dynaamisia voimia. Nämä voimat ovat luonteeltaan tyypillisesti iskumaisia värähdyksiä ja ne vaikuttavat katkaisijan perustuksiin, jolloin anturat, peruspultit ja tukirakenne on mitoitettava kestäämään syntyneitä rasituksia. KytKentävoimien suuruus vaihtelee katkaisijan koosta ja ohjauslaitteen toimintaoperaatiosta riippuen (ks. taulukko 7.9).

Taulukko 7.9 Tyypillisiä katkaisijan kytKentävoimia pysty- ja vaakatasossa. (ABB [viitattu 2.5.2014], s. 63)

Rated voltage kV	Horizontal force kN	Vertical force kN
123 - 170	1 - 15	10 - 75
245 - 300	5 - 20	25 - 75
362 - 550	10 - 30	50 - 120

Taulukosta nähdään, että katkaisijan koko riippuu jännitteestä (Suomessa kantaverkon katkaisijat ovat jännitteeltään 110-400 kV). Lisäksi huomataan, että pystysuuntaiset voimat (*vertical forces*) ovat suurempia kuin vaakasuuntaiset voimat (*horizontal forces*). Kuormien suuruudesta todettakoon, että ne ovat merkittäviä. Katkaisijan on kestävä toimintaoperaatioiden aiheuttamat voimat vaurioitumatta. Kuvassa 7.9 on katkaisija, joka on vaurioitunut toimintaoperaation aiheuttaman voiman seurauksena.



Kuva 7.9 Vaurioitunut katkaisija korjaustoimenpiteen kohteena.

Kuvasta näkee katkaisijan ohjauslaitteen, joka sijaitsee ohjainlaatikossa. Se on kiinnitetty putkipilariin, joka toimii katkaisijan tukirakenteena. Toimintaoperaatiosta aiheutunut voima on vaurioittanut katkaisijan (kuvasta näkee, että ohjainlaatikon vasemmassa kyljessä oleva teräslevy on taittunut mutkalle).

7.6 Oikosulkuvoimat

Oikosulkuvoimat ovat oikosulkuvirtojen aiheuttamia dynaamisia voimia, jotka kohdistuvat sähkövirtaa kuljettaviin osiin ja edelleen tukirakenteisiin. Oikosulkuvoimat määrittävät yhdessä oikosulkuvirran aiheuttaman termisen kuorman ja oikosulkuvalokaaren vaikutuksen kanssa rakenteen oikosulkulujuuden. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 86)

Oikosulku on jännitteellisten osien (tässä johtimien) välinen sähköä johtava yhteys muun kuin laitteen tai kuormituksen kautta. Oikosulkutapauksia ovat kolmivaiheinen, kaksivaiheinen ja yksivaiheinen oikosulku (eli maasulku). Laitokset mitoitetaan tyypillisesti joko kolmi- tai kaksivaiheisen oikosulun aiheuttamalle rasitukselle.

Tässä työssä tarkastelu rajataan jäykkiin kiskoihin, sillä ne ovat yleensä ulkokytkinlaitoksilla alttiimpia oikosulkuvirran aiheuttamille rasituksille. Lisäksi tarkastellaan vain kolmivaihejärjestelmän vaihejohtimia, mikä käytännössä sulkee pois nippujohtimet (kahdesta tai useammasta samaan vaiheeseen kuuluvasta osajohtimesta), joita käytetään pääasiassa voimajohdoissa. Näiden rajausten tarkoituksena on selkeyttää oikosulkuvoiman laskentaa, jättäen pois harvinaiset tapaukset.

Oikosulkuvirtojen mekaanisten rasitusten määrittäminen perustuu pääosin kahteen teokseen: standardiin SFS-EN 60865-1 ja CIGREN julkaisuun No. 214. Näistä jälkimmäinen antaa tarkempia laskentaohjeita ja on muutenkin yksityiskohtaisempi.

7.6.1 Oikosulkuvirran aiheuttamat voimat

Kiskoissa kulkee sähkövirta, jolloin ne siis kuljettavat sähkövarauksia. Liikkuva sähkövaraus synnyttää ympärilleen magneettikentän, joka puolestaan synnyttää voiman liikkuvaan varaukseen. Voima vaikuttaa kohtisuorasti sähkövirran suuntaa (eli johdinta) kohden. (Inkinen et al. 2002, s. 144-145) Tämä voima kohdistuu kiskoihin ja edelleen tukirakenteisiin.

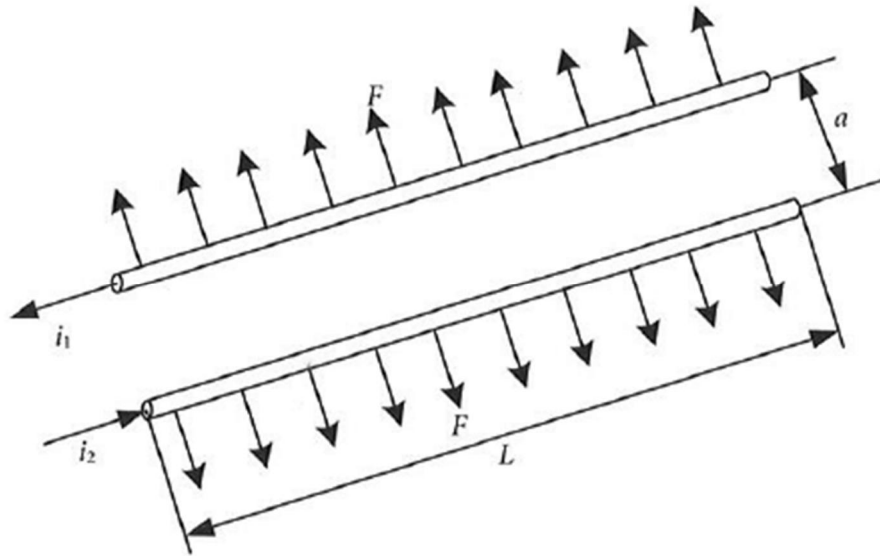
Sähkövirta on ajasta riippuva suure ja se saa kiskot värähtelemään. Tiedetään, että värähtelyllä on eräitä maksimiarvoja tiettyinä ajanhetkinä. Näitä ovat maksimi taipuma, maksimi jännitys johtimessa sekä maksimi voima tukirakenteessa. Kun edellä mainituista tiedetään kaksi viimeistä arvoa, niin rakenteen oikosulkuvoiman kestävyys voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella. Taipuma ei kiinnosta tässä yhteydessä. Yleensä riittää määrittää maksimiarvot, jolloin paikalla tai ajanhetkellä ei ole merkitystä. Määrittäminen tehdään kahdessa vaiheessa (CIGRE 2002, s.10):

1. Lasketaan oikosulkuvirran aiheuttama staattinen maksimivoima F johtimessa.
2. Lasketaan oikosulun aiheuttama rakenteen dynaaminen vaste kertomalla edellä saatu voima kertoimien V avulla. Tulo FV on niin sanottu staattinen ekvivalentti voima.

Kahden yhdensuuntaisen virtajohtimen välinen voima F voidaan laskea kaavasta 7.27 (IEC 60865-1, s. 23).

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_1 i_2 L}{a} \quad 7.27$$

jossa L on tukipisteiden välinen etäisyys, a johdinten välinen kohtisuora etäisyys ja i_1, i_2 virtojen hetkellisarvot. Lisäksi μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, joka on $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am. Samansuuntaiset virrat vetävät johtimia puoleensa ja erisuuntaiset virrat työntävät johtimia kauemmas toisistaan (ks. kuva 7.10).



Kuva 7.10 Kaksi yhdensuuntaista johdinta ja niihin kohdistuvat voimat. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 87)

Kuvassa virrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin, jolloin voima F kohdistuu johtimista poispäin. Mikäli virrat kulkisivat samaan suuntaan, vaihtuisi molempien voimien suunta.

Yhtälön 7.27 perusteella voidaan laskea myös kaksi- ja kolmivaiheisissa oikosuluisa esiintyvät voimat, kun vaihejohtimet sijaitsevat samassa vaakatasossa ja niitä ei ole jaettu osajohtimiin (mikä kiskojen kohdalla pätee lähes aina). Tyhjäkäyvässä johdinjärjestelmässä tapahtuu kaksivaiheinen oikosulku, kun vioittuneissa johtimissa kulkee eri suuntiin vikavirta kolmannen johtimen ollessa nollajohdin (ei kuljeta virtaa). Mikäli kaksivaiheinen oikosulku oletetaan täysin epäsymmetriseksi ja oikosulkuvirran tasakomponentin vaimeneminen vähäiseksi, sekä myötä- ja vastaimpedanssit yhtä suuriksi, voidaan kaksivaiheisen oikosulkuvoiman maksimiarvo laskea kolmivaiheisen virran mukaan kaavasta 2.30. Kolmivaiheisessa oikosulussa suurin voima F_3 kohdistuu keskimmäiseen vaiheeseen L2 ja se voidaan laskea kaavasta 2.28. Laitavaiheiden L1 ja L3 maksimivoima lasketaan kaavasta 2.29. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 88-90)

$$F_{3,max,L2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}L}{2} \frac{i_{p3}^2}{a} \quad 2.28$$

$$F_{3,max,L1} = F_{3,max,L3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{3 + 2\sqrt{3}L}{8} \frac{i_{p3}^2}{a} = 0,933 F_{3,max,L2} \quad 2.29$$

$$F_{2,max} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3} \right)^2 \frac{L}{a} = \frac{\sqrt{3}}{2} F_{3,max,L2} = 0,866 F_{3,max,L2} \quad 2.30$$

missä a on vierekkäisten vaiheiden etäisyys toisistaan, L on vaihejohtimien tukipisteiden välinen etäisyys ja i_{p2} sekä i_{p3} ovat oikosulkuvirran maksimiarvoja. Kaavoista huomataan, että suurin voima aiheutuu keskimmäiseen johtimeen kolmivaiheisessa oikosulussa, toiseksi suurin voima laitavaiheisiin kolmivaiheisessa oikosulussa ja pienin voima kaksivaiheisessa oikosulussa. Tämä pätee, kun myötä- ja vastaimpedanssit oletetaan samansuuruisiksi ja tasakomponentin vaimenemista ei oteta huomioon. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 90) Jatkossa voiman maksimiarvoa merkitään suureella F_m .

7.6.2 Kiskoihin kohdistuvat rasitukset

Värähtelevät oikosulkuvoimat vaikuttavat monimutkaiseen elastiseen kiskosto- ja tukijärjestelmään, jolla on useita ominaistuuksia. Oikosulkuvoimat voivat aiheuttaa metallin väsymisilmiöitä. Resonanssitaajuutta (50 Hz tai 100 Hz) lähestyttäessä kiskostoon kohdistuva rasitus kasvaa ja sen ylittäessä kiskomateriaalin myötörajan $\sigma_{0,2}$ kiskomateriaali muuttuu plastiseksi. Kiskon plastisoituminen ei itsessään vaikuta kiskon oikosulkulujuuteen, vaan tukirakenteiden rasituksiin. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 91)


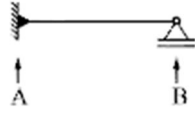

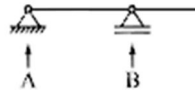
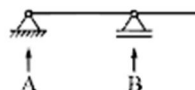
Oikosulkuvirran aikaansaama staattinen voima F_m aiheuttaa johtimeen jännityksen, joka voidaan laskea kaavasta 2.31 (CIGRE 2002, s. 13).

$$\sigma_{m,stat} = \frac{M_{pl,max}}{W_m} = \beta \frac{F_m L}{8W_m} \quad 2.31$$

jossa β on kiinnitystavan huomioon ottava kerroin ja W_m johtimen taivutusvastus.

Johtimille sallitaan melko suuriakin oikosulkuvirran aiheuttamia muodonmuutoksia. Niiden materiaalia hyödynnetään jopa niin, että johtimissa sallitaan enimmillään kaksinkertainen materiaalin myötölujuuden suuruinen johdinrasitus ($2\sigma_{0,2}$). Teräsrakenteilla maksimi kapasiteetti saavutetaan, kun käytetään plastisia niveliä. Nämä otetaan laskennassa huomioon kertoimilla β ja q , joista ensimmäinen huomioi jäykän tukipisteen plastiset nivelet ja jälkimmäinen jännevälän plastisen nivelen. Kertoimen β arvoja on esitetty taulukossa 7.10.

Taulukko 7.10 Parametrit α ja β erilaisille tuille. (IEC 60865-1, s. 67)

type of beam and support		$M_{pl,max}$	$M_{el,max}$	β	α
single span beam	A and B: supported 	-	$\frac{F_m l}{8}$	1,0	A: 0,5 B: 0,5
	A: fixed B: supported 	$\frac{F_m l}{11}$	$\frac{F_m l}{8}$	$\frac{8}{11} = 0,73$	A: 0,625 B: 0,375
	A and B: fixed 	$\frac{F_m l}{16}$	$\frac{F_m l}{12}$	$\frac{8}{16} = 0,5$	A: 0,5 B: 0,5
continuous beam with equidistant supports	two spans 	$\frac{F_m l}{11}$	$\frac{F_m l}{8}$	$\frac{8}{11} = 0,73$	A: 0,375 B: 1,25
	3 or more spans 	$\frac{F_m l}{11}$	$\frac{F_m l}{8}$	$\frac{8}{11} = 0,73$	A: 0,4 B: 1,1

Perusoletuksena on, että kisko mallinnetaan yksiaukkoisena vapaasti tuettuna palkkina, jolloin $\beta = 1,0$. Jos yksiaukkoisen palkki on molemmista päistään jäykästi kiinnitetty, niin $\beta = 0,5$, jolloin saadaan pienennettyä johdinrasitusta. Tämä johtuu siitä, että plastinen taivutusmomentti M_{pl} tuella saavutetaan ennen kimmoteorian mukaista taivutusmomenttia M_{el} ja näin ollen taivutusmomentti tuella pienenee. Kerroin β saadaan siis taivutusmomenttien M_{pl} ja M_{el} suhteesta. (CIGRE 2002, s. 13)

Nyt edellä määritettyyn (staattiseen) johdinrasitukseen $\sigma_{m,stat}$ huomioidaan rakenteen dynaaminen vaste parametrien V_σ ja V_r avulla (ks. kaava 7.32) (CIGRE 2002, s. 13).

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \sigma_{m,stat} = \beta V_\sigma V_r \frac{F_m L}{8 W_m} \quad 7.32$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- β = tukirakenteen huomioon ottava kerroin
- V_σ = järjestelmän dynaamiset ominaisuudet huomioon ottava kerroin
- V_r = epäonnistuneesta kolmivaiheisesta pikajälleenkytkennästä aiheutuvan rasituslisän huomioon ottava kerroin
- W_m = vaihejohtimen taivutusvastus
- F_m = oikosulkuvirran aikaansaama maksimivoima
- L = vaihejohtimien tukipisteiden välinen etäisyys.

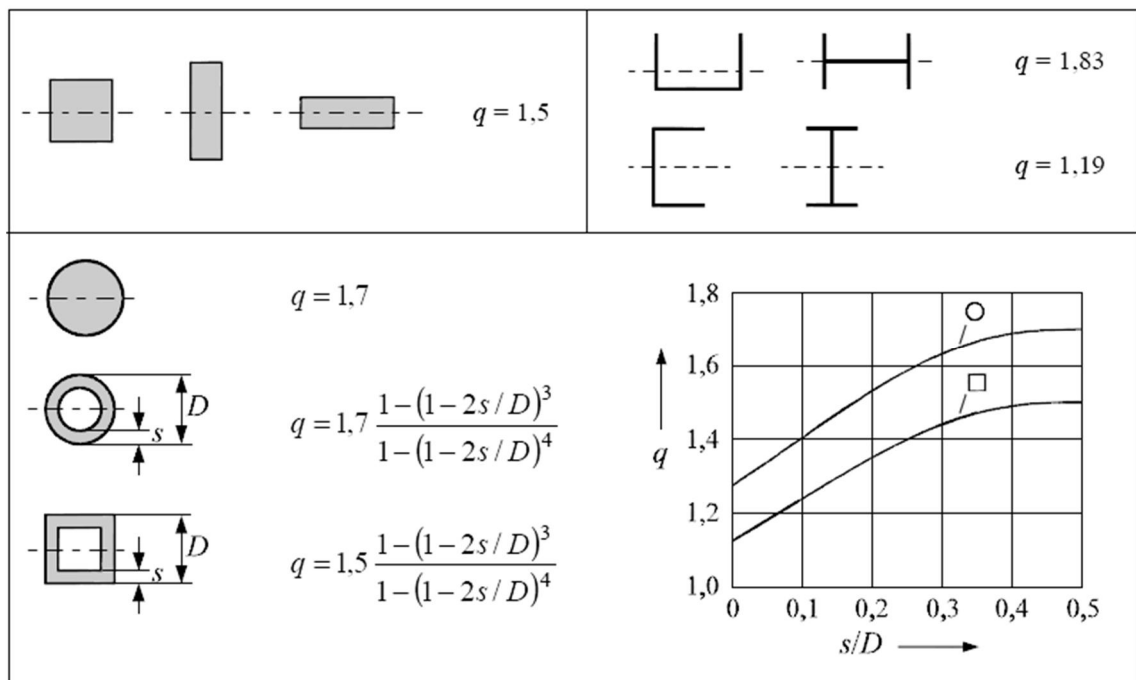
Vaihejohtimen kestävyys tarkastetaan kaavasta 7.33.

$$\sigma_m \leq q \sigma_{0,2} \quad 7.33$$

missä q on plastisuuskertoimen ja $\sigma_{0,2}$ johdinmateriaalin myötöraja. Myötörajan ylittyminen on harvinaista, mutta jos niin tapahtuu, syntyy pysyviä (plastisia) muodonmuutoksia. Tämä muuttaa ominaistaajuutta ja lisää vaimennusta (Elovaara & Haarla 2011b, s. 94).

Plastisuuskertoimen riippuu kiskon poikkileikkauksen geometriasta. Kun jänneväliin syntyy plastinen nivel, niin johtimen profiilille voidaan käyttää plastista taivutusvastusta. Tällöin plastisuuskertoimen q arvo kasvaa ja materiaalia pystytään hyödyntämään enemmän. Taulukossa 7.11 on esitetty plastisuuskertoimen määrittäminen eri profiileille. Osajohtimille, mikäli niitä esiintyy, ei määritellä plastisuuskertoainta. Tällä pyritään pitämään osajohtimien etäisyydet muuttumattomina. (CIGRE 2002, s. 13)

Taulukko 7.11 Plastisuuskertoimen q erilaisille poikkileikkauksille. (IEC 60865-1, s. 69)



Sähköasemien kiskoina käytetään tyypillisesti pyöreitä putkia, joiden ainevahvuuden s ja ulkopinnan halkaisijan D välinen suhde s/D on tyypillisesti 0,02...0,14. Tällöin plastisuuskertoimen arvo q olisi 1,3...1,5.

7.6.3 Tukirakenteisiin kohdistuvat rasitukset

Oikosulkuvirta aiheuttaa tukirakenteille voiman F_d , joka voidaan laskea kaavasta 7.34. Voiman vaikutuskohta on tukieristimen yläpään liitoksessa. Tukirakenne eristimiseen mallinnetaan yleensä ulokkeena, jolloin momentti kasvaa lineaarisesti. Suurjännitesähköasemien rakenteiden jäykkyys on pienempi kuin keski- ja pienjänniteasemilla. Lisäksi ne vaikuttavat systeemin värähtelyyn. Asiasta on kuitenkin tehty kokeita ja todettu, että dynaamisesta kuormasta aiheutuva momentti on likimain lineaarinen ja sähkömagneetti-

sesta voimasta aiheutuva momentti on lineaarinen. Tämän perusteella on todettu, että voimaa F_d voidaan pitää oikeutettuna. (CIGRE 2002, s. 17)

$$F_d = V_F V_r \alpha F_m \quad 7.34$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- V_F = kiskon ominaisvärähtelyn vaikutukset huomioon ottava kerroin
- V_r = jälleenkytkennät huomioonottava kerroin
- α = kiskon kiinnitystavan eli voimien jakaantumisen huomioon ottava kerroin (ks. taulukko 7.10)
- F_m = oikosulkuvirran aikaansaama maksimivoima.

Tukirakenteelle tuleva voima F_d ei saa ylittää valmistajan määrittämää tukieristimen kestävyyttä F_{Rd} . Tämän ehdon mukaan $F_d < F_{Rd}$.

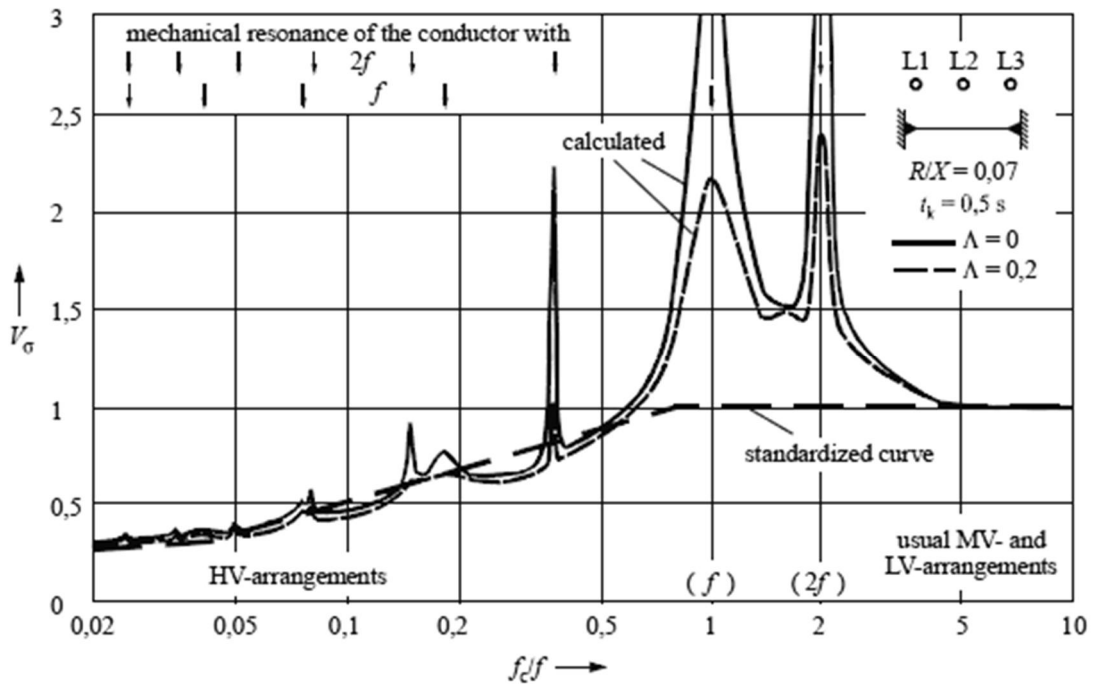
7.6.4 Kertoimet V_σ , V_r ja V_F

Kertoimien V määrittämiseksi on tehty paljon testejä, mittauksia ja analyttistä sekä numeerista laskentaa. Tarkoituksena on ollut yksinkertaistaa (sangen monimutkaista) rakenteiden oikosulkulujuuden laskentaa tehden siitä käyttäjäystävällisempää. Tällä mahdollistetaan rakenteiden riittävän luotettava suunnittelu ilman, että joudutaan käyttämään esimerkiksi FEM-laskentaa. (CIGRE 2002, s. 10)

Standardi IEC 60865-1 määrittää tuloille $V_\sigma V_r$ ja $V_F V_r$ maksimiarvot, joita voidaan käyttää. Ne ovat esitetty liitteessä 3. Suurjännitesähköasemilla ne kuitenkin antavat (liian) konservatiivisia tuloksia. Tämän vuoksi kertoimille V_σ , V_r ja V_F voidaan käyttää pienempiä arvoja määrittämällä kiskojärjestelmän ominaistajuus. Liitteissä 5 ja 6 on esitetty oikosulkuvoimien laskenta käyttäen konservatiivisempaa taulukkomitoitusta ja tarkempaa kiskojärjestelmän ominaistajuuksien kuvaajiin perustuvaa laskentaa.

7.6.4.1 Kerroin V_σ

Kuva 7.11 esittää järjestelmän dynaamiset ominaisuudet huomioon ottavan kertoimen V_σ määrittämisen uloimmille vaihejohtimille L1 ja L3 ominaistajuuden f_c ja verkon taajuuden f suhteen funktiona.



Kuva 7.11 Kertoimen V_σ määrittäminen uloimmille vaihejohtimille L1 ja L3 ominaistaajuuden f_c ja verkon taajuuden f suhteen funktiona kolmivaiheisessa oikosulussa. (CIGRE, s. 17)

Kuvassa on kolme käyrää: standardisoitu käyrä (*standardized curve*) ja kaksi lasketua käyrää (*calculated*) käyttäen kahta eri suhteellista vaimennuskerrointa Λ . Lasketut käyrät antavat suurempia kertoimen V_σ arvoja kuin standardisoitu käyrä.

Termit f ja $2f$ ovat resonanssitaajuuksia. Euroopassa verkon taajuutena käytetään 50 Hz, jolloin resonanssitaajuuksia ovat 50 Hz ja 100 Hz. Näillä taajuuksilla kertoimen V_σ arvo nousee merkittävästi. Sisimmäisen vaihejohtimen L2 arvo on uloimpia vaihejohtimia suurempi vain resonanssitaajuudella $2f$ ja kun suhde $f_c/f > 1$, mutta pääsääntöisesti $f_c/f < 1$, jolloin kiskojen jännitys on ulommilla vaihejohtimilla suurempi.

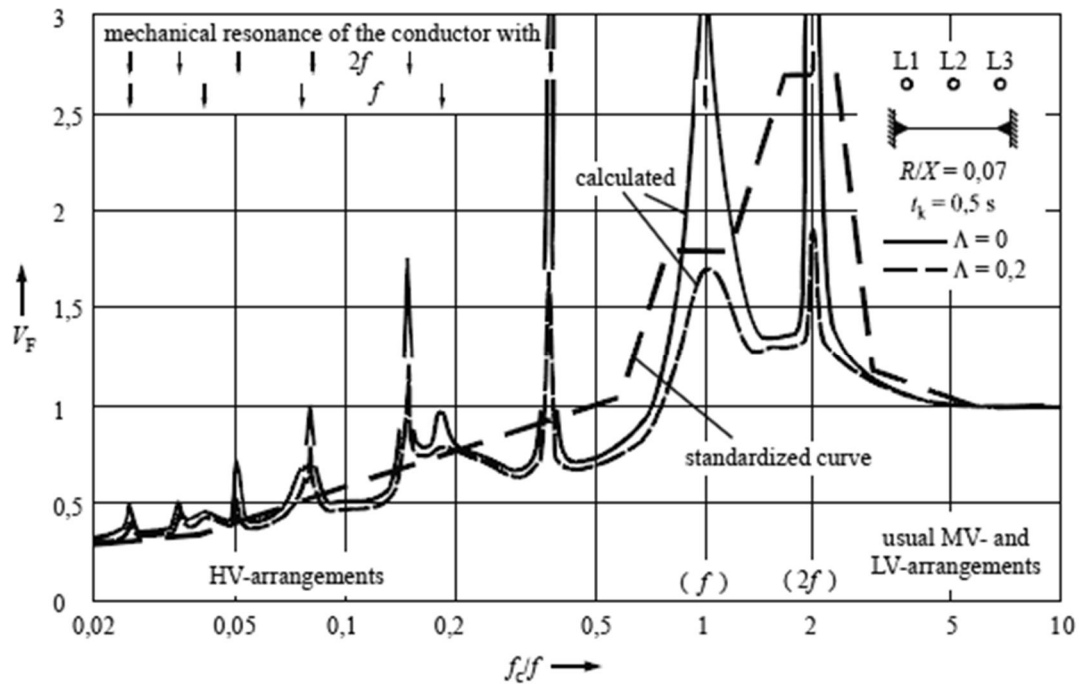
Kuvasta havaitaan myös, että suurjännitesähköasemien rakenteille (*HV-arrangements*) $V_\sigma < 1$ ja keski- ja pienjännitesähköasemien rakenteille (*MV- ja LV-arrangements*) $V_\sigma \geq 1$. (CIGRE 2002, s. 15)

Kuvan kiskot on mallinnettu molemmista päistään jäykästi kiinnitettyinä palkkeina. Sähköasemilla kiskot ovat kuitenkin asennettu tukieristinten päälle, jotka ovat kimmoisia ja alttiita värähtelylle. Näin ollen tuet eivät ole jäykkiä. (CIGRE 2002, s. 16)

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että suurjännitesähköasemien rakenteiden rasituksia on mahdollista pienentää, kun määritetään rakenteiden ominaistaajuus f_c . Mikäli näin ei tehdä, kertoimelle V_σ voidaan käyttää arvoa 1.

7.6.4.2 Kerroin V_F

Kiskon ominaisvärähtelyn vaikutukset huomioon ottava kerroin V_F määritetään samoilla periaatteilla kuin kerroin V_σ . Kerroin V_F voidaan määrittää kuvasta 7.12. Käyrien määrittämisessä on taas oletettu, että tuet ovat yksiaukkoisia, molemmista päistään jäykästi kiinnitettyjä palkkeja. Tällöin kiskojen deformatuminen tapahtuu kimmoisella alueella.



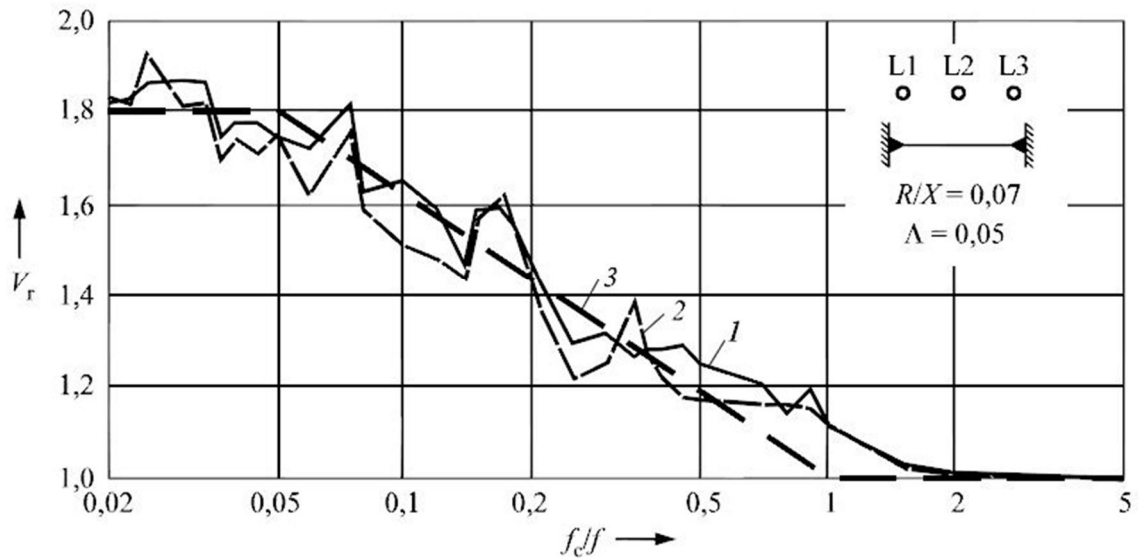
Kuva 7.12 Kertoimen V_F määrittäminen uloimmille vaihejohtimille L1 ja L3 ominaistaajuuden f_c ja verkon taajuuden f suhteen funktiona kolmivaiheisessa oikosulussa. (CIGRE, s. 19)

Kuvan kerroin V_F ovat määritetty uloimmille vaihejohtimille L1 ja L3 (samasta syystä kuin termiä V_σ määritettäessä). Koska suurjännitesähköasemilla suhde f_c/f on huomattavasti pienempi kuin 1, niin myös kerroin $V_F < 1$ (tällöin tulee määrittää kiskon ominaistaajuus f_c).

Mikäli käytetään eripituisia johtimia, niin resonanssi on huomioitava. Ilmiö voi aiheuttaa jopa 20 % voiman lisäyksen tukirakenteille, jos johdin on 0,85...2-kertainen muihin johtimiin nähden. Tukirakenteille tuleva kuorman lisäys on kasvava entisestään, jos johdin on pienempi kuin 0,85-kertainen tai suurempi kuin 2-kertainen muihin johtimiin verrattuna. Tämän vuoksi johtimien pituus tulisi rajoittaa 20 % pienempään muihin johtimiin verrattuna. Muussa tapauksessa johtimet tulee erottaa tukirakenteista käyttäen joustavia liitoksia. (CIGRE 2002, s. 19)

7.6.4.3 Kerroin V_r

Myös jälleenkytkennät huomioonottava kerroin V_r on riippuvainen johdinten ominaistaajuudesta. Sen arvo vaihtelee välillä 1...1,8 ja riippuu siitä onko kolmivaiheinen pika-jälleenkytkentä käytössä (jolloin $V_r = 1,8$) vai ei (jolloin $V_r = 1$). Kuvassa 7.13 on esitetty kertoimen V_r määrittäminen kolmivaiheisessa oikosulussa.



Kuva 7.13 Kertoimen V_r määrittäminen uloimmille vaihejohtimille L1 ja L3 ominaistajuuden f_c ja verkon taajuuden f suhteen funktiona kolmivaiheisessa oikosulussa. (CIGRE, s. 20)

Kuvassa esiintyy kolme käyrää, joiden määrittämisessä on oletettu, että tuet ovat yksiaukkoisia, molemmista päistään jäykästi kiinnitettyjä palkkeja. Kuvassa on käytetty kaikille käyriä samaa suhteellista vaimennuskerrointa Λ . Käyrä 1 on johtimen jännitys, käyrä 2 tukirakenteille tulevat voimat ja käyrä 3 standardisoitu käyrä.

Mikäli johdinrasitusta σ_m laskettaessa kiskojen ominaistajuutta ei määritetä, niin voidaan käyttää arvoa $V_r = 1,8$. Tämä antaa varmalla puolella olevia tuloksia.

7.6.5 Kiskojen ominaistajuus

Kiskojen taloudellinen suunnittelu on mahdollista vain, kun systeemin dynaamiset vaikutukset otetaan huomioon. Käytännössä tämä tarkoittaa, että jännitysten ja voimien pienentäminen on sallittua. Kuten kohdassa 7.6.4 todettiin, kiskojen ominaistajuus on tässä keskeinen tekijä. Yhden vaihejohtimen ominaistajuus voidaan laskea kaavasta 7.35 (CIGRE 2002, s. 21).

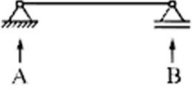
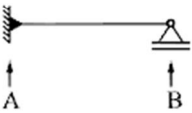
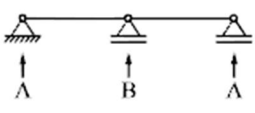

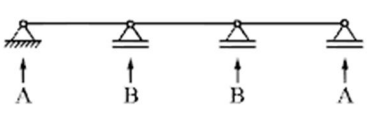
$$f_c = \frac{\gamma}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad 7.35$$

jossa merkinnät tarkoittavat seuraavaa:

- γ = kiskon tuennan huomioon ottava kerroin
- L = tukipisteiden välinen etäisyys
- E = kiskon kimmokerroin
- J = kiskon poikkileikkauspinnan neliömomentti
- m' = johtimen massa per pituus.

Edellä esitetyt suureet riippuvat kiskon materiaalista ja dimensioista. Niiden määrittämiseen löytyy ohjeita muun muassa mekaniikan oppikirjoista. Kerroin γ voidaan sen sijaan määrittää taulukosta 7.12.

Taulukko 7.12 Kertoimen γ määrittäminen erilaisille tuille. (IEC 60865-1, s. 67)

type of beam and support		γ
single span beam	continuous beam with equidistant supports	
A and B: supported 		1,57
A: fixed B: supported 	two spans 	2,45
A and B: fixed 	3 or more spans 	3,56

Kiskot mallinnetaan tyypillisesti yksiaukkoisina vapaasti tuettuina palkkeina, jolloin taulukon mukaisesti käytetään arvoa $\gamma = 1,57$.

7.7 Vetokuorma

Vetokuormalla tarkoitetaan johtimiin kohdistuvaa termomekaanista kuormitusta, joka aiheutuu lämpötilan muutoksesta. Ulkokytkinlaitoksilla tämä koskee kaikkia johtimia, mutta erityisesti jäykkiä kiskoja, joihin tarkastelu tässä rajataan.

Johdinten pituus muuttuu, kun niiden lämpötila muuttuu. Tämä pituudenmuutos ΔL voidaan laskea kokemusperäisestä kaavasta 7.36 (Salmi & Pajunen, 2010, s. 123).

$$\Delta L \approx \alpha L \Delta T \quad 7.36$$

jossa α on pituuden lämpötilakerroin ja L johtimen pituus. Johtimet ovat pääasiassa alumiinia, jolle lämpötilakerroin on $24 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (Salmi & Pajunen 2010, s. 429). Kaava pätee, kun lämpöliike pääsee tapahtumaan vapaasti ilman esteitä.

Toisaalta lämpötilan muutos ΔT aiheuttaa johtimeen termomekaanisen kuormituksen. Normaalivoiman N ja siirtymän ΔL välinen yhteys voidaan laskea kaavasta 7.37, kun oletetaan johtimen materiaali homogeeniseksi ja tasapaksuksi (Salmi & Pajunen 2010, s. 136).

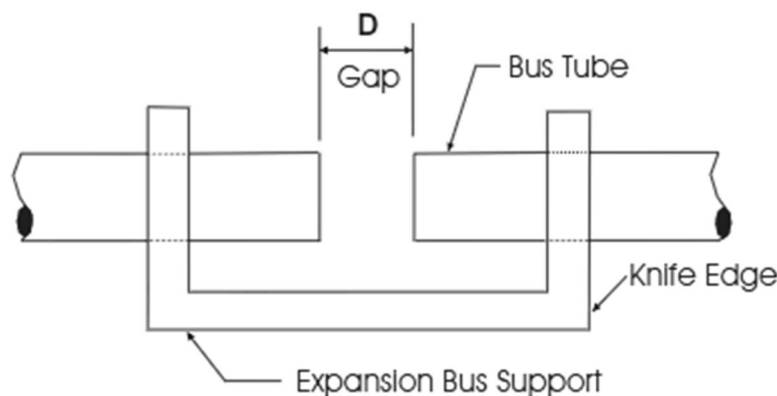
$$\Delta L = \frac{NL}{EA} \quad 7.37$$

jossa E on kimmokerroin ja A poikkileikkauksen ala. Alumiinin kimmokerroin on 70 GPa (Salmi & Pajunen 2010, s. 429).

Merkitsemällä kaavat 7.36 ja 7.37 yhtä suuriksi, päädytään kaavaan 7.38, josta voidaan laskea lämpötilakentän muutoksesta aiheutuva vetokuorma N , kun lämpöliike on täysin estetty.

$$N = \alpha \Delta T E A \quad 7.38$$

Standardi SFS 6001 määrittää, että vetokuormitus lasketaan olosuhteiden aiheuttamasta suurimmasta johdinjännityksestä (SFS 6001, s. 30). Suomessa määritetty ilman lämpötila on enintään 40 °C ja minilämpötila -50 °C. Tällöin teoreettinen ilman lämpötilanmuutos ΔT on suurimmillaan 90 °C. Lasketaan tätä vastaavan lämpötilanmuutoksen aiheuttama kokoojakiskon normaalivoima, joka vaikuttaa tukirakenteeseen. Oletetaan, että kisko on alumiinia, jonka ulko-/sisäpinnan mitat ovat 100/80 mm. Sijoittamalla nämä kaavaan 7.38, saadaan normaalivoimaksi 428 kN. Tämä vastaa 42,8 tonnin kuormaa, eli kyse on huomattavan suuresta kuormasta, joka aiheuttaisi 5 metriä korkealle teräspilarille 2140 kNm suuruisen momentin. On selvää, että tällaisia kuormia ei voi päästä syntymään. Käytännössä johdinrakenteet toteutetaan siten, että lämpötilan aiheuttama pituudenmuutos pääsee tapahtumaan kunkin kiskon päässä (ks. kuva 7.14).



Kuva 7.14 Kuva esittää kahden peräkkäisen kiskon (Bus Tube) liitososaa (Expansion Bus Support), joka sallii lämpöliikkeen kiskon päissä olevan väliaukon (Gap, D) ansiossa. (ASCE 2008, s. 107)

Kuvan kaltaisen liitososan keskeisin tekijä on väliaukon pituus D , joka määräytyy projektikohtaisesti. Sen valintaan vaikuttaa erityisesti projektissa käytettävät lämpötilat, jotka muodostuvat ilman lämpötiloista, mutta myös sähkön aiheuttamista ilmiöistä kuten oikosuluista. Väliaukon vaadittu pituus D voidaan laskea kaavasta 7.6, kun tiedetään lämpötilanmuutos ΔT sekä jänneväli L . Mikäli lämpötilanmuutos on 80 °C ja jänneväli 10 metriä (liitoksen molemmin puolin), niin pituudenmuutokseksi saadaan 19 mm, jolloin väliaukon pituudeksi riittää 20 mm. Lämpöliikkeen mahdollistavia liitososia käytetään luonnollisesti vain kahden peräkkäisen kiskon välillä, ei kiskojen päissä.

Näitä lämpöliikkeen sallivia kiskojen liitososia on useita erilaisia, mutta kaikki toimivat samalla periaatteella. Kuvassa 7.15 on esitetty eräällä kantaverkon sähköasemalla käytössä oleva liitos.



Kuva 7.15 Kokoojakiskon akselin suuntaisen lämpöliikkeen mahdollistavat liitokset kiskojen välissä.

Kuvan liitos muodostuu kahdesta osasta. Alemman osan tehtävä on kiinnittää kiskot tukirakenteeseen (kuvassa tukieristimeen) ja ylemmän osan johtaa sähköä liitoksen yli kiskolta toiselle.

Käytettäessä liitososia, jotka mahdollistavat kiskojen vapaan liikkumisen, voidaan johdinten vetokuorma unohtaa. Aina on kuitenkin huomioitava, että kiskojen välinen pituus on riittävä, ettei kiskojen suuntaista normaalivoimaa pääse syntymään.

7.8 Johdinten katkeamiset

Johdinten katkeamiset lukeutuvat standardin SFS 6001 määrittelemiin kuormiin, jotka sähköasemien laitteiden ja tukirakenteiden perustuksineen on kestävä. Sähköasemilla johdinten katkeamiset ovat kuitenkin muihin kuormituksiin nähden varsin mitättömiä.

Johdin voidaan ajatella yksiaukkoisena palkkina, joka on tuettu molemmista päistään. Mikäli johdin katkeaisi toisen tuen tyvestä, niin johdinkuorma siirtyisi kokonaan toiselle tuelle (kun oletetaan, ettei se yllä maahan). Käytännössä johtimen katkeaminen aiheuttaisi jonkinlaisen dynaamisen, ajasta riippuvan, kuorman. Tätä on kuitenkin hankala määrittää teoreettisesti ja sen tutkiminen vaatisi muun muassa kenttäkokeita.

Johtokentän laitteet ovat useimmiten noin 10 metrin etäisyydellä toisistaan, mikä vastaa samalla johdinten jänneväliä. Jos käytetään aikaisemmin mainittuja Finch-johtimia, joiden paino pituusyksikköä kohden on noin 2 kg/m, niin niiden omapaino olisi tällöin 0,20 kN. Rakenneteknisesti tämän suuruinen kuorma on mitätön.

Tarkasteltaessa sähköaseman portaaleihin kiinnitettyjä ilmajohtoja, on johdinten katkeamiset kuitenkin otettava huomioon. Portaaliin kiinnitetyt ilmajohdot ovat jännelähtäen huomattavasti pidempiä ja johtoja on useampia, minkä vuoksi kuormat ja seuraamukset ovat aivan eri luokkaa. Kohdassa 6.4 kerrottiin, että erityyppisille pylväille on pyritty luomaan tyyppiratkaisuita. Myös sähköasemien portaaleja on vakioitu, ainakin kantaverkkoon kuuluvilla asemilla.

Tässä työssä laskennallinen tarkastelu on rajattu ulkokytkinlaitosten rakenteisiin. Tämän, ja edellä esitettyjen seikkojen perusteella voidaan todeta, että johdinten katkeamiset eivät aiheuta ulkokytkinlaitoksilla merkittäviä kuormia. Poikkeuksen tekee sähköasemien portaalit, mutta nekin ovat usein vakioituja tyyppiratkaisuita.

7.9 Värähtely

Sähköasemilla värähtely voi aiheutua joko sähkömagneettisesta rasituksesta (jota käsiteltiin kohdassa 7.6) tai tuulesta. Suomessa maanjäristyksestä aiheutuva värähtely on merkitykseltään (SFS 6001, s. 31).

Alumiiniset putkikiskot ovat alttiita tuulen aiheuttamalle värähtelylle. Hoikkina ja kevyinä rakenteina kiskot voivat alkaa värähtelemään putken halkaisijan suuruusella amplitudilla, kun värähtelyn taajuus on samaa luokkaa kiskojen ominaistajuuden kanssa. Nämä suuret amplitudit aiheuttavat dynaamisia lisärasituksia rakenteeseen. Tämän vuoksi kiskojen sisään asennetaan yleensä johdinkaapelit, jotka lisäävät kiskojen vaimenemista ja rajoittavat värähtelyn amplitudia. Putkikiskoon asennetaan tyypillisesti yksi johdinkaapeli, mutta luotettavuuden parantamiseksi voidaan niitä asentaa kaksi kappaletta siten, että ne limittyvät 1/3 kiskon pituudesta. Taulukko 7.13 antaa suuntaa vaimennusjohtimien käytöstä kiskoissa. (McWade 2008)

Taulukko 7.13 Suositellut vaimennusjohtimet erikokoisille poikkileikkaukseltaan pyöreille putkikiskoille. (McWade 2008)

Recommended Damping Cables		
Tube-Ø mm	Al-cable mm ²	Permissible spacing between supports without damping cables m (normal values)
63	120	3.0
80	150	3.5
100	240	4.5
120	300	5.5
160	500	7.5
200	625	9.5
250	625	12.0

Esimerkiksi putkikiskon, jonka halkaisija on 80 mm, asennetaan pinta-alaltaan 150 mm² vaimennusjohdin. Mikäli vaimennusjohtoa ei käytettäisi, jännelähtäen suositellaan käytettäväksi 3,5 metriä.

Tuulen aiheuttamaa värähtelyä syntyy kun tuulen turbulenssin pyörteet vaikuttavat putkimaisen kiskon toiselta puolelta toiselle. Tuloksena on vuorotteleva voima, joka vaikuttaa kohtisuorasti tuulensuuntaa vasten. Ilmiö vaatii suhteellisen vakaan tai lami-naarisen tuulen, jotta se pystyisi ylläpitämään värähtelyä. Tyypillisesti tällaisen värähte-lyn amplitudi on pieni, mutta se voi kasvaa huomattavasti, jos muodostuneen värähtelyn taajuus on sama kuin sähköaseman rakenteen ominaistaajuus (jolloin puhutaan reso-nanssista). Mikäli näin pääsee tapahtumaan, voi tapahtua rakenteen väsymismurtuma. Murtuma tapahtuu kohdassa, jossa on suurin jäykkyys, eli tyypillisesti liitoksissa.

Pitkien ja hoikkien rakenteiden ominaistaajuus voidaan herättää tuulennopeudella, joka on suunnilleen 6...7 m/s. Tällaisia tuulennopeuksia voidaan olettaa esiintyvän mis-sä tahansa. Vain yksittäisiä tällaisia tapauksia, joissa rakenteet ovat alkaneet värähtelee-mään, on kuitenkin havaittu. Tämä johtuneee siitä, että johtimet, eristimet ja maakaapelit lisäävät huomattavasti rakenteellista vaimennusta ja tuuli on usein liian turbulenttia jak-sollisten pyörteiden muodostamiseen. (ASCE 2008, s. 110)

Tuulen aiheuttaman rakenteen värähtelyn määrittämiseen analyttisiin menetelmin ei vielä ole olemassa käytännöllisiä suunnittelutyökaluja. On kuitenkin olemassa kaksi eri tapaa kontrolloida kiskojen värähtelyä (ASCE 2008, s. 110):

1. Kasvattamalla rakenneosan jäykkyyttä. Tämä voidaan toteuttaa käyttämällä suu-rempia profiileita tai ristikoimalla rakenneosia.
2. Kasvattamalla rakenneosan vaimennusta. Tämä voidaan toteuttaa asentamalla ketju pystysuoran rakenteen, kuten putkipylvään, sisään. Paino tulisi olla noin 5 % rakenneosan painosta.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähkönsiirtorakenteiden suunnittelua voidaan pitää rakennesuunnittelun erikoisalueena. Alan kirjallisuudessa aiheesta on niukasti tietoa, eikä aihe muutenkaan ole kovin tunnettu. Tähän on useita syitä. Yleisesti ottaen sähköverkon rakentamisen volyymi on muuhun rakentamiseen verrattuna selvästi pienempi. Toki sähkönsiirtorakenteita edelleen rakennetaan ja saneerataan, mutta ei samassa mittakaavassa kuin muuta rakennuskantaa. Lisäksi niiden suunnittelu on keskittynyt usein tietyille alan yrityksille, jotka ovat erikoistuneet nimenomaan sähkönsiirtorakenteiden suunnitteluun.

Suomessa kantavien rakenteiden suunnittelua ohjaa Eurokoodi, joka sisältää rakenteiden suunnitteluperusteet, kuormat, eri materiaalit, rakenneosat ja niiden mitoituksen. Eurokoodia ei kuitenkaan voi täysin soveltaa sähkönsiirtorakenteisiin, sillä se ei ota huomioon kaikkia niihin vaikuttavia oleellisia asioita. Tämä pätee erityisesti ulkokytkinlaitosten suunnittelussa. Voimajohtojen ja niiden tukirakenteiden suunnitteluun on olemassa standardi (SFS-EN 50341-1), jossa on varsin kattavasti esitetty miten ne tulee suunnitella ja mitoitaa. Myös sähköasemien rakenteiden suunnitteluun on olemassa standardi (SFS 6001), mutta se jättää paljon tulkinnan ja soveltamisen varaa. Tämän vuoksi Eurokoodia suositellaan käytettäväksi niiltä osin kuin se on mahdollista ja täydentämällä sitä erityisesti kuormien määrittämisen osalta muilla lähteillä.

Standardissa SFS 6001 on ilmoitettu ne mekaaniset kuormitukset, jotka sähköaseman tukirakenteiden tulee kestää. Kuormitukset on jaettu kahteen kategoriaan, normaaleihin ja poikkeuksellisiin kuormituksiin. Lisäksi standardissa annetaan ohjeita eri kuormitusyhdistelyille, mutta ei kuitenkaan kerrota kuormanyhdistelykertoimia, jotka ovat oleellisia eri kuormitusyhdistelmiä määritettäessä. Työssä pohdittiin, mitä kertoimia samanaikaisille muuttuville kuormille voisi käyttää. Kahdesta syystä päädyttiin siihen, että kuormia ei tarvitse pienentää. Ensinnäkin, samanaikaisia muuttuvia kuormia esiintyy tyypillisillä kuormitusyhdistelyillä vain kaksi kappaletta. Toiseksi, kuormien vaikutus ei ole yhtä huomattava kuin rakennuksissa, sillä sähköaseman rakenteet ovat merkittävästi pienempiä eikä niillä esiinny lainkaan tasaista kuormaa. Myöskään tuuli ei vaikuta samalla tapaa, koska rakenteiden pinta-alat ovat niin pienet. Näiden perusteella voidaan todeta, ettei olla liian konservatiivisella puolella ja toisaalta varmuudesta ei myöskään tingitä.

Työn päätarkoituksena oli selvittää sähköaseman rakenteisiin aiheutuvia kuormituksia ja niiden suuruuksia. Kuormitukset annetaan standardissa SFS 6001 ja tässä työssä ne päädyttiin jakamaan kolmeen kategoriaan: laskennallisesti määriteltäviin kuormiin, lähtötietoina saataviin kuormiin ja merkityksettämiin kuormiin. Näistä ensimmäiset

ovat kuormia, joiden suuruus määritetään laskennallisesti. Niitä ovat tuuli- ja jääkuorma sekä oikosulkuvoima. Seuraavana ovat lähtötietoina saatavat kuormat, jotka saadaan laitevalmistajilta ja joita ovat käytännössä vain kytkentävoimat. Viimeisenä ovat merkityksettömät kuormat, jotka eliminoidaan siten, että niitä ei käytännössä tarvitse laskea tai niiden suuruusluokka on merkityksettömän pieni. Näitä ovat vetokuorma, johdinten katkeamiset ja tuulen aiheuttama värähtely.

Tuuli- ja jääkuorman sekä oikosulkuvoimien selvittämiseksi laadittiin laskenta-esimerkit, jotka löytyvät liitteistä. Niiden perusteella voidaan todeta, että kyseiset voimat jäävät suuruusluokaltaan melko pieniksi. Toisaalta laitevalmistajilta tulevat kytkentävoimat voivat olla näihin verrattuina moninkertaisia.

Yhteenvetona kuormista voidaan todeta, että pois lukien suurimpia kytkentävoimia, ulkokytkinlaitosten tukirakenteiden materiaalin kestävyys tulee harvemmin mitoittavaksi tekijäksi. Rakenteet mitoittaa useimmiten taipuma, mikä pätee etenkin hoikille kokoojakiskoille.

Ulkokytkinlaitosten rakenteiden suunnittelusta voidaan todeta, että se on varsin suoraviivaista. Tukirakenteet muodostuvat pääosin teräksestä valmistetuista pilareista, palkeista, kehistä tai ristikoista. Ne voidaan usein mallintaa irrallisina kokonaisuuksina, jolloin jatkuva sortuma ei ole vaarana. Sähkövirta ja erilaiset laitteet kuitenkin aiheuttavat epätavanomaisia ilmiöitä ja kuormia, jotka suunnittelussa on huomioitava. Tärkeä suunnitteluun liittyvä asia on myös turvaetäisyydet, joita ulkokytkinlaitoksilla on useita.

LÄHTEET

ABB. Horizontal center break disconnecter type GW55, up to 245 kV [WWW]. [viitattu 10.5.2014]. Saatavissa: <http://new.abb.com/high-voltage/disconnectors/center-break-disconnectors/gw55>

ABB. Live Tank Circuit Breakers – Application Guide [WWW]. [viitattu 2.5.2014]. Saatavissa: <http://www.abb.com/product/db0003db002618/c12573e7003302ad412567e5002f2490.aspx?productLanguage=us&country=FI>

ABB. Power Capacitors and Harmonic Filters – Buyer’s Guide [WWW]. [viitattu 9.5.2014]. Saatavissa: <http://new.abb.com/high-voltage/capacitors/hv/capacitor-banks/open-rack-shunt-banks-qbank>

ASCE. 2008. Substation Structure Design Guide. Virginia, USA, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 113. 164 p.

ASCE. 2010. Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading. 3rd Edition. Virginia, USA, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 74. 204 p.

CIGRÉ 214. 2002. The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations. Part II. Companion brochure to No. 105. CIGRE Working Group 23-03. 141 s.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot 1. Helsinki, Otatieto. 520 s.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot 2. Helsinki, Otatieto. 550 s.

Energel Oy. Sähköasemaliittimet [WWW]. [viitattu 9.4.2014]. Saatavissa: <http://www.energel.com/fin/infra/sahkoasemaliittimet.htm>

Energiateollisuus ry. Energialähteet [WWW]. [viitattu 14.1.2014]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet>

Energiateollisuus ry. Verkon rakenne [WWW]. [viitattu 16.1.2014]. Saatavissa: <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/verkon-rakenne>

Energiavirasto. Sähköverkon haltijat [WWW]. [viitattu 17.3.2014]. Saatavissa: <http://www.energiavirasto.fi/sahkoverkon-haltijat>

Eurolaite, Reaktorit [WWW]. [viitattu 9.5.2014]. Saatavissa:
<http://www.eurolaite.fi/reaktorit>

Fingrid Oyj. Osakkeet ja osakkeenomistajat [WWW]. [viitattu 15.1.2014]. Saatavissa:
<http://www.fingrid.fi/fi/sijoittajat/Osakkeet%20ja%20osakkeenomistajat/Sivut/default.aspx>

Fingrid Oyj. 2014. Peltopylväs -esite. 7 s.

Fingrid Oyj. Verkkokartta 2014 [WWW]. [viitattu 21.1.2014]. Saatavissa:
<http://www.fingrid.fi/SiteCollectionImages/fi-FI/Yritys/Voimansiirtoverkkokartta/Verkkokartta2014FI.jpg>

Fingrid Oyj. Voimajohdot osana sähkönsiirtoa [WWW]. [viitattu 6.2.2014]. Saatavissa:
<http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCvoimajohdot.aspx>

Heikkilä, J. 2004. Sähköasema ja sen tärkeimmät laitteet. Fingrid Oyj:n lehti. 3, 1, s. 25 [viitattu 25.2.2014]. Saatavissa:
http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/Ajankohtaista%20liitteet/Yrityslehdet/2004/fingrid_1_04.pdf

IEC 60865-1. Short-circuit currents – Calculation of effects. Part 1. Definitions and calculation methods. Geneve, 1993. 115 s.

Inkinen, P., Manninen, R. & Tuohi, J. 2002. Momentti 2: Insinöörifysiikka. Keuruu, Otava. 600 s.

Korpinen, L., Silvennoinen, S., Lehtelä, R., Havunen, I. & Kaartinen, S. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus [verkkojulkaisu]. [viitattu 2.4.2014]. Saatavissa:
http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf

Laine, Ritva. Sähköpostiviesti, 2014.

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki, Otatieto. 295 s.

McWade Productions (Pty) Ltd. Aluminium Tubular Busbars for HV Substations [verkkojulkaisu]. 2008. [viitattu 25.2.2014]. Saatavissa:
http://www.mcwade.co.za/files/tech_report_alu_tub_busbars_for_hv_sub.pdf

Partanen, J. Suurjännitetekniikka [verkkojulkaisu]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [viitattu 28.2.2014]. Saatavissa:
<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0300/luennot/johdanto.pdf>

Prysmian Group – tuotekuvasto [WWW]. [viitattu 12.5.2014]. Saatavissa: http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/pd/downloads/datasheets/ACSR_AACSR.pdf

RIL 201-1-2011. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki, Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry. 190 s.

Rudus Oy - tuotekuvasto [WWW]. [viitattu 24.3.2014]. Saatavissa: <http://www.rudus.fi/tuotteet/infraelementit/sahkonsiirto/kaapelikanavaelementit>

Rudus Oy - tuotekuvasto [WWW]. [viitattu 28.3.2014]. Saatavissa: <http://www.rudus.fi/tuotteet/infraelementit/sahkonsiirto/pylvasperustuselementit>

Salmi, T. & Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere, Pressus Oy. 462 s.

SFS-EN 1990. 2002. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 138 s.

SFS-EN 1991-1-4. 2005. Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-4: Tuulikuormat. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 253 s.

SFS-EN 1993-3-1 + AC. 2006. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 3-1: Mastot ja savupiiput. Mastot. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 75 s.

SFS-EN 50341-1. 2012. Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 216 s.

SFS-EN 50341-3-7. 2010. Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä. Osa 3-7: Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 54 s.

SFS 6001. 2014. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki, suomen standardisoimisliitto. 90 s. (*Julkaistaan 2014*)

SFS 6002. 2005. Sähkötyöturvallisuus. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 57 s.

SFS NA EN 1990. Suomen kansallinen liite. Helsinki 2007, Ympäristöministeriö. 7 s.

SFS NA EN 1991-1-4. Suomen kansallinen liite. Helsinki 2007, Ympäristöministeriö. 4 s.

Uunila Oy. Työmaat ja kuvat [WWW]. [viitattu 28.3.2014]. Saatavissa:
<http://www.uunila.fi/tyomaa/tuovilan-seinajoki/>

Työsuojeluhallinto. Metsätyöt ja sähkölinjat [WWW]. Tampere, Työsuojeluhallinto.
2011, [viitattu 9.5.2014]. Saatavuus:
http://tyosuojelujulkaisut.wshop.fi/documents/2011/03/TSO_37.pdf

LIITELUETTELO

- Liite 1: Vähimmäisetäisyyden arvot
- Liite 2: Muuntajan etäisyysvaatimukset
- Liite 3: Maksimi-arvot dynaamisten kertoimien tuloille
- Liite 4: Tuuli- ja jääkuorman aiheuttamat johdinkuormat
- Liite 5: Oikosulkuvoimien laskenta taulukon mukaisesti
- Liite 6: Oikosulkuvoimien laskenta kuvaajien mukaisesti

LIITE 1: VÄHIMMÄISETÄISYYDEN ARVOT

Taulukko L1.1. Vähimmäisvälit - Jännitealue 1 ($1\text{ kV} < U_m \leq 245\text{ kV}$). (SFS 6001, s. 36).

Jännitealue	Laitteen suurin käyttöjännite	Koejännite (kestotaso) salamasyöksyjännitteellä	Pienin vaiheen ja maan ja vaiheiden välinen etäisyys (N)	
I	U_m (tehollisarvo)	1,2/50 μs (huippuarvo)	sisälaitteistot	ulkolaitteistot
	kV	kV	mm	mm
	3,6	20	60	120
		40	60	120
	7,2	40	60	120
		60	90	120
	12	60	90	150
		75	120	150
	17,5	75	120	160
		95	160	150
	24	95	160	
		125	220	
	36	145	270	
		170	320	
	52	250	480	
	72,5	325	630	
	123	450	900	
		550	1100	
	145	450	900	
		550	1100	
		650	1300	
	170	550	1100	
		650	1300	
		750	1500	
	245	650	1300	
		750	1500	
		850	1700	
		950	1900	
		1050	2100	

Taulukko L1.2. Vähimmäisvälit – Jännitealue 2 ($U_m > 245$ kV). (SFS 6001, s. 37-38)

Jännitealue	Laitteen suurin käyttöjännite	Koejännite (kestotaso) kytKentäsyöKsy jännitteellä	Pienin vaiheen ja maan ja vaiheiden välinen etäisyys	
	U _m (tehollisarvo)	250/2550 μs (huippuarvo)	johdin-ristikko ilmaväli	tanko-rakenne ilmaväli (M)
	kV	kV	mm	mm
II	300	750	1600 1700	1900
		850	1800 1900	2400
	362	850	2200 1900	2400
		950	2200	2900
	420	850	2200 2400	2400
		950	2600	2900
		1050	2600	3400
	550	950	2200 2400	2900
		1050	2600	3400
		1175	3100	4100
	800	1300	3600	4800
		1425	4200	5600
		1550	4900	6400
	1100	1425	4200	5600
		1550	4900	6400
		1675	5600*	7400*
		1800	6300*	8300*
	1200	1675	5600*	7400*
		1800	6300*	8300*
		1950	7200*	9500*

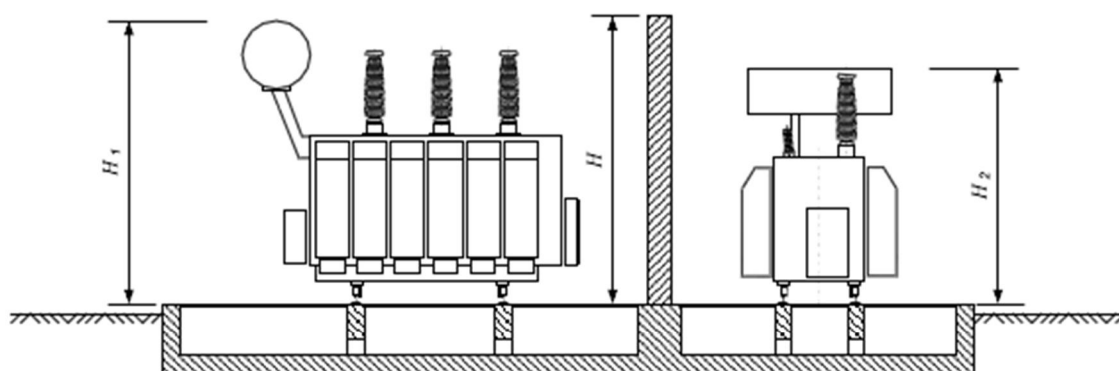
* Alustava arvo, joka saattaa muuttua.

LIITE 2: MUUNTAJAN ETÄISYYSVAATIMUKSET

Taulukko L2.1. Ulkoasennettavien muuntajien etäisyysvaatimukset. (SFS 6001, s. 63)

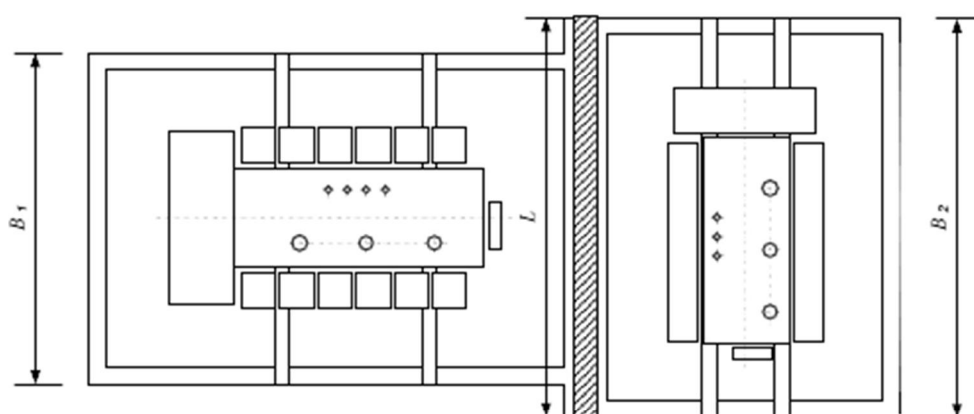
Muuntajatyyppi	Nestemäärä	Etäisyys G	
		toisiin muuntajiin ja palonkestäviin rakennuspintoihin	syttyviin rakennuspintoihin
Öljyeristeiset muuntajat (O)	I	m	m
	$200 < \dots < 2\,000$	3	8
	$2\,000 \leq \dots < 20\,000$	5	10
	$20\,000 \leq \dots < 45\,000$	10	20
	$\geq 45\,000$	15	30
Vähemmän palonarat neste-eristeiset muuntajat (K)	$200 < \dots < 3\,800$	1,5	8
	$\geq 3\,800$	4,5	15
Kuivamuuntajat (A)	Paloluokka	Etäisyys G rakennuspintaan tai viereisiin muuntajiin	
		Vaakaetäisyys m	Pystyettäisyys m
	F0	1,5	3
	F1	0	0
Huom. Hartsieristeisten muuntajakäämitysten määrääjoin toistuvaan puhdistukseen on varattava riittävä tila, jotta likaantunut ilma ei aiheuta sähkövikoja ja palovaaraa.			

Kuva L2.1. Erotusseinä muuntajien välissä. (SFS 6001, s. 68)



$$H \geq H_1 \quad (\text{with } H_1 > H_2)$$

$$L \geq B_2 \quad (\text{with } B_2 > B_1)$$



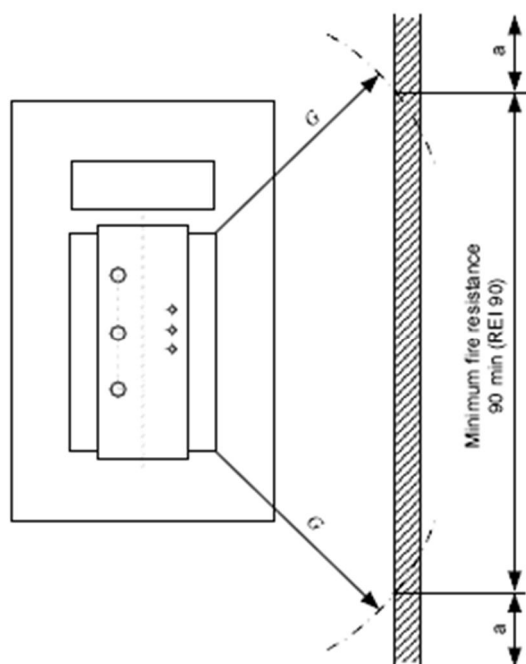
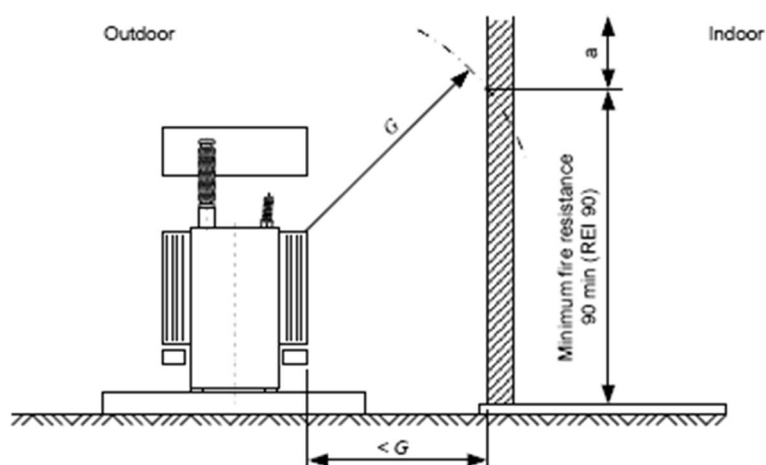
Minimum fire resistance 60 min for the separating wall (EI 60)

$$H \geq H_1 \quad (\text{kun } H_1 > H_2)$$

$$L \geq B_2 \quad (\text{kun } B_2 > B_1)$$

Erotusseinän palonkestävyys vähintään 60 min (EI 60)

Kuva L2.2. Muuntajan ja rakennuksen välinen palosuojaus. (SFS 6001, s. 69)



Palonkestävyys vähintään 90 min (REI 90)

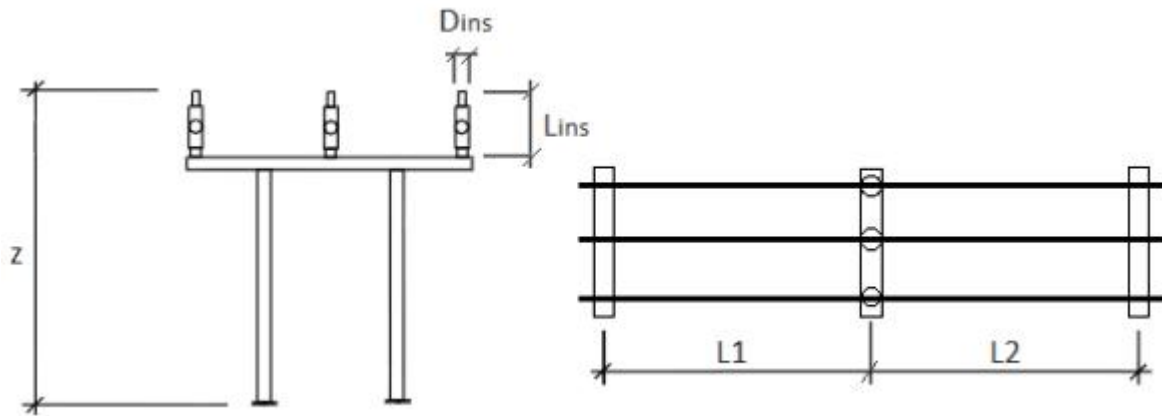
LIITE 3: MAKSIMIARVOT DYNAAMISTEN KERTOIMIEN TULOILLE

Taulukko L3.1. Maksimi arvot tuloille $V_{\sigma}V_r$, $V_{\sigma s}V_{rs}$, V_FV_r . (IEC 60685-1, s. 65)

Type of short circuit	System		
	Without three-phase automatic reclosing	With three-phase automatic reclosing	With and without three-phase automatic reclosing
	$V_{\sigma}V_r$, $V_{\sigma s}V_{rs}$	$V_{\sigma}V_r$, $V_{\sigma s}V_{rs}$	V_FV_r
line-to-line	1,0	1,8	<div> $2,0$ for $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$ </div> <div> $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ for $0,5 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} < 1,0$ </div> <div> $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ </div> <div> <div>range</div> <div>①</div> <div>②</div> <div>③</div> </div>
three-phase	1,0	1,8	<div> $2,7$ for $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,370$ </div> <div> $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ for $0,370 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} < 1,0$ </div> <div> $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ </div> <div> <div>range</div> <div>①</div> <div>②</div> <div>③</div> </div>

Lasketaan johtimien aiheuttamat erottimen tukirakenteeseen kohdistuvat rasitukset. Laskenta tehdään kohtien 7.2...7.4 mukaisesti.

Kuva 1 esittää esimerkissä käytettyjä erottimen tukirakenteen ja eristimien mittoja. Johtimet ovat poikkileikkaukseltaan pyöreitä.



Kuva 1. Erottimen tukirakenne ja tukieristimet.

Lähtötiedot

Mitat

$z := 6\text{m}$

Johtimen ja laitteen liitoksen korkeus maanpinnasta

$L_1 := 4\text{m}$

Toispuoleisen johtimen 1 pituus

$L_2 := 5\text{m}$

Toispuolisen johtimen 2 pituus

Johtimet

$d_c := 30\text{mm}$

Johtimen halkaisija

$n := 3$

Vierekkäisten johtimien lukumäärä

Eristimet

$L_{ins} := 2500\text{mm}$

Eristimen tehollinen pituus

$D_{ins} := 300\text{mm}$

Eristimen ulkohalkaisija

Tuulikuorma

Tuulenpaine EC 1991-1-4 mukaan

$c_{dir} := 1$

Suuntakerroin

$c_{season} := 1$

Vuodenaikakerroin

$v_{b,0} := 21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Tuulennopeuden modifioimaton perusarvo
$v_b := c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot v_{b,0} = 21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Tuulennopeuden perusarvo
$z_0 := 0.05\text{m}$	Maastoluokka II
$z_{0,\text{II}} := 0.05\text{m}$	Vertailuarvo
$k_r := 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,\text{II}}} \right)^{0.07}$	Maastokerroin
$c_r := k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) = 0.91$	Rosoisuuskerroin
$c_0 := 1$	Pinnanmuotokerroin
$v_m := c_r \cdot c_0 \cdot v_b = 19.102 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Tuulennopeuden modifioitu perusarvo
$k_1 := 1$	Pyörteisyyskerroin
$\sigma_v := k_r \cdot v_b \cdot k_1 = 3.99 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Turbulenssin keskihajonta
$I_v := \frac{\sigma_v}{v_m} = 0.209$	Tuulenpuuskien intensiteetti
$\rho_a := 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Ilman tiheys
$q_p := \left(1 + 7 \cdot I_v \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot v_m^2 = 0.562 \cdot \text{kPa}$	Puuskanopeuspaine

Johtimien tuulikuorma

$z_m := \frac{z_0}{m} = 0.05$	Rosoisuusmitta, merk. Matchcad laskentaa varten ilman yksikköä
$z_n := \frac{z}{m} = 6$	Johtimen korkeus, merk. Mathcad laskentaa varten ilman yksikköä
$L_z := 300 \cdot \left(\frac{z_n}{200} \right)^{0.67+0.05 \cdot \ln(z_m)} \cdot \text{m} = 48.406 \text{ m}$	Turbulenssin pituuskaala
$L_m := \frac{L_1 + L_2}{2} = 4.5 \text{ m}$	Vierekkäisten jänneiden keskipituus

$$B := \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{I_m}{L_z}} = 0.878$$

Taustakerroin, merk. Mathcad laskentaa varten ilman potenssi-merkintää

$$R := 0$$

Resonanssivastekerroin, merk. Mathcad laskentaa varten ilman potenssi-merkintää

$$k_p := 3$$

Huippukerroin

$$G_c := \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v \cdot \sqrt{B + R}}{1 + 7 \cdot I_v} = 0.883$$

Rakenteellinen kerroin

$$C_c := 1$$

Johtimen vastuskerroin

$$Q_{Wc} := n \cdot q_p \cdot G_c \cdot C_c \cdot d_c \cdot \frac{(L_1 + L_2)}{2} = 0.201 \cdot \text{kN}$$

Johtimesta tukirakenteelle aiheutuva tuulikuorma

Eristimien tuulikuorma

$$G_{ins} := 1$$

Eristimen rakenteellinen kerroin

$$C_{ins} := 1.2$$

Eristimen vastuskerroin

$$A_{ins} := L_{ins} \cdot D_{ins} = 0.75 \text{ m}^2$$

Eristimen pinta-ala

$$Q_{Wins} := n \cdot q_p \cdot G_{ins} \cdot C_{ins} \cdot A_{ins} = 1.516 \cdot \text{kN}$$

Eristimeen kohdistuva tuulikuorma

Jääkuorma

$$d_I := 20 \text{ mm}$$

Jään paksuus

$$D_{tot} := d_c + 2 \cdot d_I = 70 \cdot \text{mm}$$

Johtimen ekvivalentti halkaisija

$$A_I := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{tot}^2 - d_c^2) = 3.142 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Kertyneen jään pinta-ala

$$\rho_I := 900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Jään tiheys

$$I := \rho_I \cdot A_I \cdot g = 27.728 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Jääkuorma pituusyksikköä kohden

$$Q_I := n \cdot I \cdot \frac{(L_1 + L_2)}{2} = 0.374 \cdot \text{kN}$$

Jäästä aiheutuva kuorma tukirakenteelle

Yhdistetty tuuli- ja jääkuorma

$$C_{Ic} := 1$$

Jään peittämän johtimen vastuskerroin

$$Q_{WIc} := n \cdot q_p \cdot G_c \cdot C_{Ic} \cdot D_{tot} \cdot \frac{(L_1 + L_2)}{2} = 0.469 \cdot \text{kN}$$

Jäätynneiden johtimien aiheuttama
tuulikuorma tukirakenteeseen

Tulokset

$$Q_{Wc} = 0.201 \cdot \text{kN}$$

Johtimien tuulikuorma

$$Q_{W_{ins}} = 1.516 \cdot \text{kN}$$

Eristimien tuulikuorma

$$Q_I = 0.374 \cdot \text{kN}$$

Jääkuorma

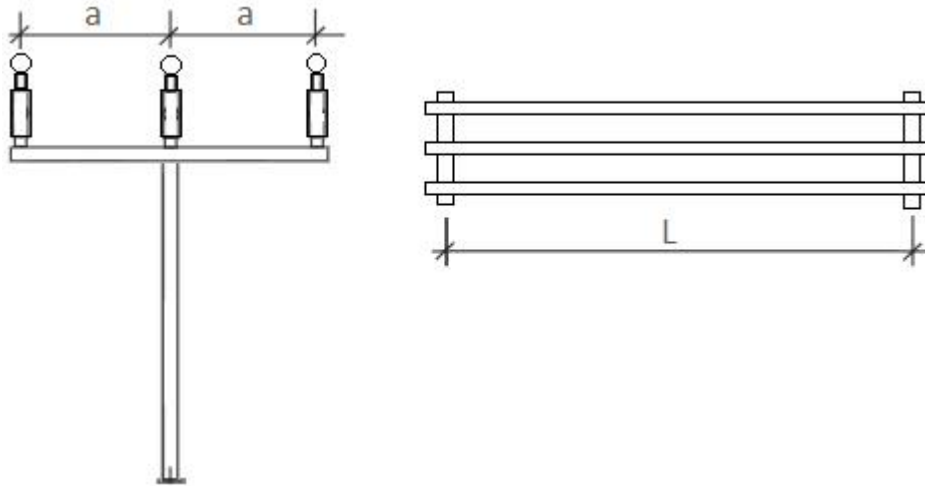
$$Q_{WIc} = 0.469 \cdot \text{kN}$$

Yhdistetty tuuli- ja jääkuorma

Lasketaan oikosulkuvirtojen aiheuttamat kiskoihin kohdistuvat rasitukset ja kiskojen tukirakenteisiin kohdistuvat rasitukset. Laskenta tehdään kohdan 7.6 mukaisesti.

Valitaan kiskoksi alumiiniseosputki, jonka ulko-/sisämitat ovat 100/80.

Kuva 1 esittää esimerkissä käytettyjä kiskojärjestelmän mittoja.



Kuva 1. Kiskojärjestelmä

Lähtötiedot

Kiskojärjestelmän mitat

$L := 10\text{m}$

$a := 2\text{m}$

Tukipisteiden välinen etäisyys

Kiskojen välinen etäisyys

Sähköiset tiedot

$i_{p2} := 40\text{kA}$

$i_{p3} := 40\text{kA}$

$f := 50\text{Hz}$

Kaksivaiheisen oikosulkuvirran maksimi

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran maksimi

Verkon taajuus

Materiaalitiedot

$\sigma_{0,2} := 160\text{MPa}$

$E := 70000\text{MPa}$

$\rho := 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Myötöraja

Kimokerroin

Tiheys

Geometria

$D_{\text{ulko}} := 100\text{mm}$

$D_{\text{sisä}} := 80\text{mm}$

Ulkopinnan halkaisija

Sisäpinnan halkaisija

$$s := \frac{D_{\text{ulko}} - D_{\text{sisä}}}{2} = 10 \cdot \text{mm}$$

Ainevahvuus

$$D := D_{\text{ulko}}$$

$$r_{\text{ulko}} := 0.5 \cdot D_{\text{ulko}}$$

Ulkopinnan säde

$$r_{\text{sisä}} := 0.5 \cdot D_{\text{sisä}}$$

Sisäpinnan säde

$$A := \pi \cdot (D_{\text{ulko}}^2 - D_{\text{sisä}}^2) = 1.131 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

Pinta-ala

$$W_m := \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(r_{\text{ulko}}^4 - r_{\text{sisä}}^4)}{r_{\text{ulko}}} = 5.796 \times 10^4 \cdot \text{mm}^3$$

Taivutusvastus

$$J := \frac{\pi}{64} \cdot D_{\text{ulko}}^4 \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{\text{sisä}}}{D_{\text{ulko}}} \right)^4 \right] = 2.898 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

Neliömomentti

$$m' := A \cdot \rho = 30.536 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Massa pituusyksikköä kohden

Oikosulkuvirran aiheuttama voima

$$F_{3,\text{max},L2} := \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{L}{a} \cdot i_{p3}^2 = 1.386 \cdot \text{kN}$$

Keskimmäiseen vaiheeseen kohdistuva
maksimivoima 3-vaih. oikosulussa

$$F_{3,\text{max},L1} := \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{3 + 2\sqrt{3}}{8} \cdot \frac{L}{a} \cdot i_{p3}^2 = 1.293 \cdot \text{kN}$$

Uloimpiin vaiheisiin kohdistuva
maksimivoima 3-vaih. oikosulussa

$$F_{2,\text{max}} := \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3} \right)^2 \cdot \frac{L}{a} = 1.2 \cdot \text{kN}$$

Kaksivaiheisen oikosulun maksimivoima

$$F_m := \max(F_{2,\text{max}}, F_{3,\text{max},L2}, F_{3,\text{max},L1}) = 1.386 \cdot \text{kN}$$

Oikosulkuvirran aiheuttama
johdinrasitus

Kiskoihin kohdistuvat rasitukset

$$\beta := 1$$

Kiskon kiinnitystavan huomioon ottava
kerroin

$$V_{\sigma} V_r := 1.8$$

Kertoimien V_{σ} ja V_r tulo

$$q := 1.7 \cdot \frac{1 - \left(1 - 2 \cdot \frac{s}{D} \right)^3}{1 - \left(1 - 2 \cdot \frac{s}{D} \right)^4} = 1.405$$

Plastisuuskerroin

$$\sigma_{m.stat} := \beta \cdot \frac{F_m \cdot L}{8W_m} = 29.882 \cdot \text{MPa}$$

Staattinen johdinrasitus

$$\sigma_m := \beta \cdot V \sigma V_r \cdot \frac{F_m \cdot L}{8W_m} = 53.788 \cdot \text{MPa}$$

Dynaaminen johdinrasitus

$$\frac{\sigma_m}{q \cdot \sigma_{0.2}} = 0.239 < 1$$

Tukirakenteisiin kohdistuvat rasitukset

$$\alpha := 0.5$$

Kiskon kiinnitystavan huomioon ottava kerroin

$$\frac{\sigma_m}{0.8 \cdot \sigma_{0.2}} = 0.42$$

Kertoimien V_F ja V_r tulo

$$V_F V_r := \begin{cases} 2.7 & \text{if } \frac{\sigma_m}{0.8 \cdot \sigma_{0.2}} \leq 0.370 \\ \frac{0.8 \cdot \sigma_{0.2}}{\sigma_m} & \text{if } 0.370 < \frac{\sigma_m}{0.8 \cdot \sigma_{0.2}} \leq 1.0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 2.38$$

Kertoimien V_F ja V_r tulo

$$F_d := V_F V_r \cdot \alpha \cdot F_m = 1.649 \cdot \text{kN}$$

Oikosulkuvirran kiskon tukipisteisiin aiheuttama maksimivoima

Tulokset

$$F_m = 1.386 \cdot \text{kN}$$

Johtimelle aiheutuva maksimivoima

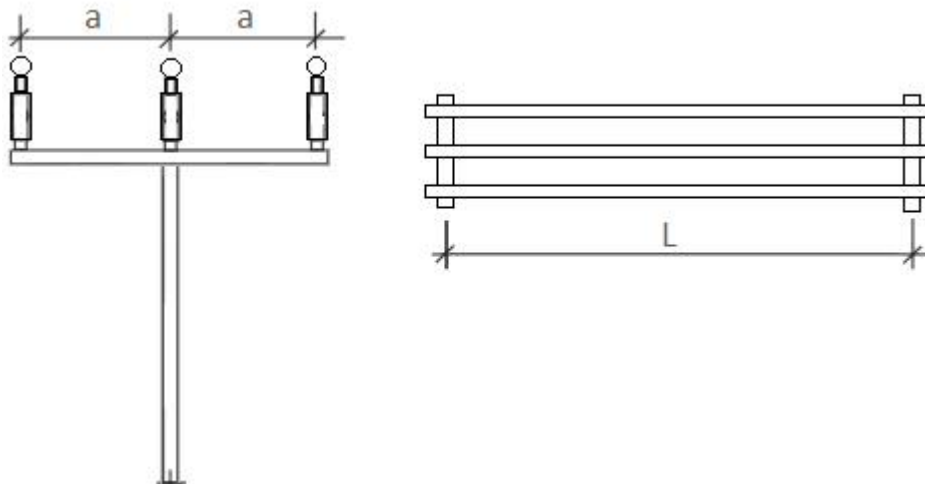
$$F_d = 1.649 \cdot \text{kN}$$

Tukirakenteelle aiheutuva maksimivoima

Lasketaan oikosulkuvirtojen aiheuttamat kiskoihin kohdistuvat rasitukset ja kiskojen tukirakenteisiin kohdistuvat rasitukset. Laskenta tehdään kohdan 7.6 mukaisesti.

Valitaan kiskoksi alumiiniseosputki, jonka ulko-/sisämitat ovat 100/80.

Kuva 1 esittää esimerkissä käytettyjä kiskojärjestelmän mittoja.



Kuva 1. Kiskojärjestelmä

Lähtötiedot

Kiskojärjestelmän mitat

$L := 10\text{m}$

$a := 2\text{m}$

Tukipisteiden välinen etäisyys

Kiskojen välinen etäisyys

Sähköiset tiedot

$i_{p2} := 40\text{kA}$

$i_{p3} := 40\text{kA}$

$f := 50\text{Hz}$

Kaksivaiheisen oikosulkuvirran maksimi

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran maksimi

Verkon taajuus

Materiaalitiedot

$\sigma_{0,2} := 160\text{MPa}$

$E := 70000\text{MPa}$

$\rho := 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Myötöraja

Kimokerroin

Tiheys

Geometria

$D_{\text{ulko}} := 100\text{mm}$

$D_{\text{sisä}} := 80\text{mm}$

Ulkopinnan halkaisija

Sisäpinnan halkaisija

$$s := \frac{D_{\text{ulko}} - D_{\text{sisä}}}{2} = 10 \cdot \text{mm}$$

Ainevahvuus

$$D := D_{\text{ulko}}$$

$$r_{\text{ulko}} := 0.5 \cdot D_{\text{ulko}}$$

Ulkopinnan säde

$$r_{\text{sisä}} := 0.5 \cdot D_{\text{sisä}}$$

Sisäpinnan säde

$$A := \pi \cdot (D_{\text{ulko}}^2 - D_{\text{sisä}}^2) = 1.131 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

Pinta-ala

$$W_m := \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(r_{\text{ulko}}^4 - r_{\text{sisä}}^4)}{r_{\text{ulko}}} = 5.796 \times 10^4 \cdot \text{mm}^3$$

Taivutusvastus

$$J := \frac{\pi}{64} \cdot D_{\text{ulko}}^4 \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{\text{sisä}}}{D_{\text{ulko}}} \right)^4 \right] = 2.898 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

Neliömomentti

$$m' := A \cdot \rho = 30.536 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Massa pituusyksikköä kohden

Kiskojen ominaistajuus

$$\gamma := 1.57$$

Kiskon tuennan huomioon ottava kerroin

$$f_c := \frac{\gamma}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m'}} = 1.28 \cdot \text{Hz}$$

Ominaistaajuus

$$\frac{f_c}{f} = 0.026$$

Ominaistaajuuden ja verkon taajuuden suhde

Kertoimet V

Kertoimien arvot luetaan kohdassa 7.5.4 esitetyistä kuvaajista.

$$V_{\sigma} := 0.35$$

Dynaamiset ominaisuudet huomioon ottava kerroin

$$V_F := 0.45$$

Ominaisvärähtelyjen vaikutukset huomioon ottava kerroin

$$V_r := 1.75$$

Jälleenkytkennät huomioonottava kerroin

Oikosulkuvirran aiheuttama voima

$$F_{3.\text{max}.L2} := \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{L}{a} \cdot i_{p3}^2 = 1.386 \cdot \text{kN}$$

Keskimmäiseen vaiheeseen kohdistuva maksimivoima 3-vaih. oikosulussa

$$F_{3.\text{max}.L1} := \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{3 + 2\sqrt{3}}{8} \cdot \frac{L}{a} \cdot i_{p3}^2 = 1.293 \cdot \text{kN}$$

Uloimpiin vaiheisiin kohdistuva maksimivoima 3-vaih. oikosulussa

$$F_{2,\max} := \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3} \right)^2 \cdot \frac{L}{a} = 1.2 \cdot \text{kN}$$

Kaksivaiheisen oikosulun maksimivoima

$$F_m := \max(F_{2,\max}, F_{3,\max.L2}, F_{3,\max.L1}) = 1.386 \cdot \text{kN}$$

Oikosulkuvirran aiheuttama
johdinrasitus

Kiskoihin kohdistuvat rasitukset

$$\beta := 1$$

Kiskon kiinnitystavan huomioon ottava
kerroin

$$q := 1.7 \cdot \frac{1 - \left(1 - 2 \cdot \frac{s}{D} \right)^3}{1 - \left(1 - 2 \cdot \frac{s}{D} \right)^4} = 1.405$$

Plastisuuserroin

$$\sigma_{m,\text{stat}} := \beta \cdot \frac{F_m \cdot L}{8W_m}$$

Staattinen johdinrasitus

$$\sigma_m := \beta \cdot V_\sigma \cdot V_r \cdot \frac{F_m \cdot L}{8W_m}$$

Dynaaminen johdinrasitus

$$\frac{\sigma_m}{q \cdot \sigma_{0.2}} = 0.081 < 1$$

Tukirakenteisiin kohdistuvat rasitukset

$$\alpha := 0.5$$

Kiskon kiinnitystavan huomioon ottava
kerroin

$$F_d := V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_m = 0.546 \cdot \text{kN}$$

Oikosulkuvirran kiskon tukipisteisiin
aiheuttama maksimivoima

Tulokset

$$F_m = 1.386 \cdot \text{kN}$$

Johtimelle aiheutuva maksimivoima

$$F_d = 0.546 \cdot \text{kN}$$

Tukirakenteelle aiheutuva maksimivoima